

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTRUMENTACIÓN DE UN COLECTOR SOLAR

NORMAN DAVID DÍAZ PORRES
IVÁN ALEXANDER CHÁVEZ FIGUEROA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA
2018

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTRUMENTACIÓN DE UN COLECTOR SOLAR

NORMAN DAVID DÍAZ PORRES
IVÁN ALEXANDER CHÁVEZ FIGUEROA

Tesis de Grado

Juan Esteban Tibaquirá Giraldo

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA
2018

Nota de aceptación

Presidente de jurado

Jurado

Jurado

Pereira, 26 de Octubre del 2018

Texto de dedicatoria

Dedico este trabajo de grado a mi padre **Norman de Jesús Díaz** quien durante toda mi existencia me ha mostrado los valores y fundamentos para ser una persona digna, respetuosa, honorable y ante todo por su paciencia y apoyo incondicional en las situaciones más adversas que se nos han presentado, también quiero hacer una dedicatoria a la memoria de mi Madre **Luz Amparo Porres Loaiza** mis hermanas y a mi futura esposa **Erika Tatiana Gómez** por su apoyo incondicional durante este proceso.

Agradezco también a mi compañero de Trabajo de grado Iván Alexander Chávez Figueroa por su persistencia y a nuestro tutor **Juan Estaban Tibaquirá** por su apoyo, paciencia, conocimiento y experiencia.

Norman David Díaz Porres

Texto de dedicatoria

Con mucha alegría le dedico este trabajo de grado a mis abuelos **Alicia y José** por su brillante amor desde siempre, a mi madre **Nancy Figueroa** por su enorme paciencia y amor, por apoyarme en mis estudios universitarios, a mis tíos **José Ricardo, Hernando y Lucero** por su compañía y apoyo, a mi amada **Daniela** quien me invita a ser mi versión más radiante. Gracias a **Norman** mi compañero de tesis por su amistad y su trabajo en equipo, a **Juan Esteban Tibaquirá** por brindarnos la oportunidad de hacer mi trabajo de grado con su asesoría y calidad humana.

Iván Alexander Chávez Figueroa

CONTENIDO

<i>CAPÍTULO 1.</i>	<i>1</i>
1.1 INTRODUCCIÓN.	1
1.2 OBJETIVO GENERAL	3
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
 <i>CAPÍTULO 2.</i>	 <i>4</i>
2.1 MARCO TEÓRICO	4
2.2 ANTECEDENTES	6
 <i>CAPÍTULO 3. DEFINICIÓN Y DISEÑO PREVIO DEL COLECTOR</i>	 <i>7</i>
3.1 DEFINICIÓN DE TIPO DE COLECTOR SOLAR	9
3.2 DISEÑO DEL COLECTOR SOLAR EXPERIMENTAL	12

CAPITULO 4.	210
4.1 MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL COLECTOR SOLAR	210
4.2 SELECCIÓN DE MATERIALES DEL COLECTOR	276
4.3 CONSTRUCCIÓN DEL COLECTOR SOLAR	365
 CAPITULO 5. INSTRUMENTACIÓN	 41
 CAPÍTULO 6. PRUEBAS REALIZADAS AL EQUIPO	 42
6.2. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	45
 ANEXOS.	 49
 TABLA DE DATOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS EN EL COLECTOR	 56
 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 76

CAPÍTULO 1.

1.1 INTRODUCCIÓN.

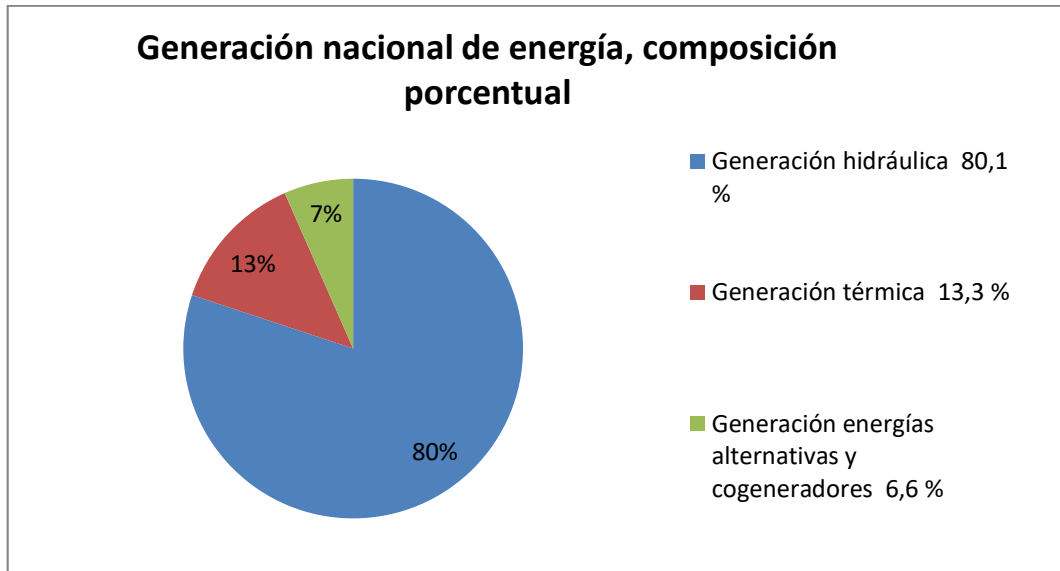
El presente documento expone las fases del desarrollo en la construcción de un colector solar experimental de placa plana, como base necesaria para el desarrollo de tecnología en energías renovables en la Universidad Tecnológica de Pereira, específicamente para la Facultad de Ingeniería Mecánica, ya que la comprobación experimental de los conceptos teóricos es una importante fuente complementaria del proceso formativo de todo estudiante de ingeniería.

Actualmente el programa de Ingeniería Mecánica no cuenta con una asignatura permanente en su pensum en el área de la energía solar, la cual es una rama de investigación y desarrollo de relevancia actual, por lo que un banco de pruebas de energía solar experimental para el Laboratorio de Ciencias Térmicas ayudará y sembrará las bases del desarrollo académico e ingenieril de generaciones venideras de esta institución.

En América Latina a pesar del gran potencial para implementar programas de energía sostenible, los combustibles fósiles siguen predominando la matriz energética regional, ya que representan cerca del 73% de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE, 2011). Esto se debe a varios factores, tales como el aumento en la producción tanto de petróleo como de gas natural experimentado por varios países de América Latina, la percepción popularizada sobre las tecnologías de energía renovable como extremadamente costosas y tecnológicamente difíciles, y la falta de marcos legislativos para promover el uso de la energía renovable en sus variadas formas.

Colombia no es ajena a las iniciativas de promoción e implementación de energías sostenibles. En cuanto a la generación nacional de energía, la composición porcentual a junio de 2011 se reportó así: 80,1% de generación hidráulica (fuente renovable); 13,3% de generación térmica y 6,6% generación de menores y cogeneradores. En energía solar y eólica Colombia sigue teniendo oportunidades, pero el avance ha sido lento.

Figura 1. Composición porcentual de generación de energías.



<http://www.ison21.es/2011/12/28/top-10-paises-del-mundo-en-energia-solar-infografia/>

Desde lo público, existe la legislación que respalda el consumo eficiente de energía, como la Ley 697 de 2001. También existen diversas cartillas y guías del Ministerio de Ambiente, así como de las gobernaciones, alcaldías y corporaciones autónomas regionales. La Unidad de Planeación Minero Energética del Ministerio de Minas y Energía implementa proyectos para zonas no interconectadas, como el Urabá antioqueño y La Guajira, donde se usan energías renovables como la solar, eólica y a partir de residuos de biomasa.

Colombia tiene el reto de jugar en las ligas mundiales de la “Energía Sostenible para Todos” y el gobierno decidió jugársela incluyendo la infraestructura y sostenibilidad dentro del Programa de Transformación Productiva que lidera el Ministerio de comercio¹. La producción energética es uno de los campos de mayor interés para los ingenieros mecánicos, ya que el conocimiento de la energía solar tiene un enfoque e importancia global y comercial. Teniendo en cuenta lo anterior, la experimentación en este campo se hace una necesidad implícita actualmente, por lo cual la construcción de un equipo de ensayos para el Laboratorio de Ciencias Térmicas de la facultad de Ingeniería Mecánica sería de gran utilidad teórica y experimental.

¹ <http://www.evwind.com/2012/10/19/colombia-en-el-ano-de-las-energias-renovables/>

1.2 OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir e instrumentar un colector solar experimental para el Laboratorio de Ciencias Térmicas de la Universidad Tecnológica de Pereira.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir el tipo de colector solar experimental.
- Diseñar el colector solar experimental.
- Construir el colector solar experimental.
- Instrumentar el colector solar experimental.
- Realizar pruebas/ensayos en el colector solar experimental.

CAPÍTULO 2.

2.1 MARCO TEÓRICO

Radiación Solar en Colombia

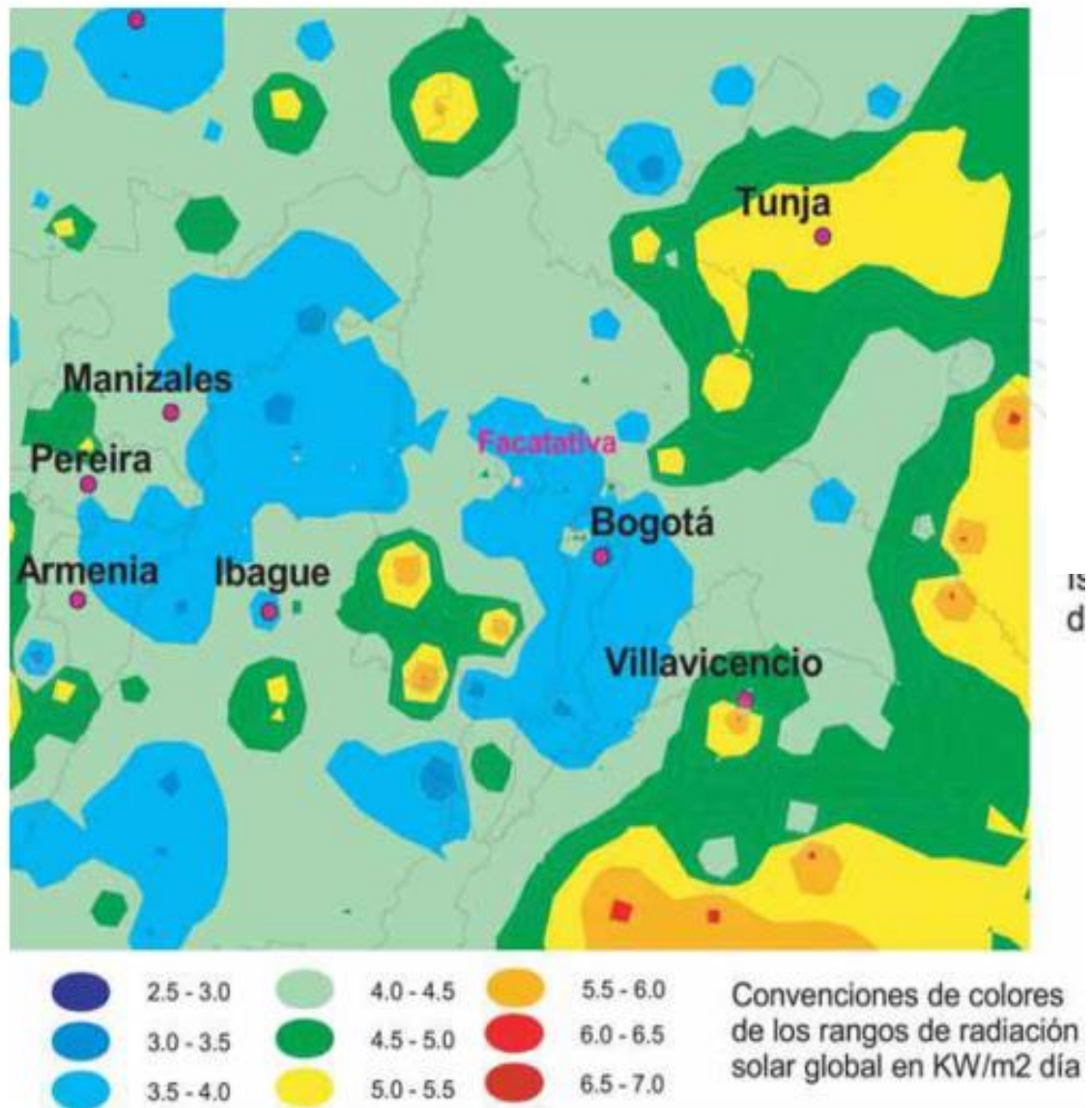
Colombia tiene buen potencial energético solar en todo el territorio, con un promedio diario multianual cercano a 4,5 kWh/m² (destacándose la península de La Guajira, con un valor promedio de 6,0 kWh/m² y la Orinoquia, con un valor un poco menor), propicio para un adecuado aprovechamiento.

Tabla 1. Disponibilidad solar por regiones de Colombia

Rango anual de disponibilidad de energía solar por regiones	
REGIÓN	kWh/m²/día
GUAJIRA	5,42 – 6,42
COSTA ATLÁNTICA	3,45 – 6,41
ORINOQUIA	3,9 – 5,9
AMAZONIA	3,9 – 4,9
ANDINA	2,9 – 4,4
COSTA PACÍFICA	2,9 – 3,9

Es importante mejorar la distribución de la ubicación geográfica de las estaciones, con criterios de región, altura sobre el nivel del mar y homogeneidad en el cubrimiento del territorio nacional. Las convenciones que mediante colores establecen los rangos de radiación solar global son las que se muestran en la siguiente figura: Nótese que al color azul oscuro se asocia el rango de 2,5 a 3,0, seguido por el azul, en el rango de 3,0 a 3,5, y así sucesivamente se realizan incrementos de 0,5 de un color al siguiente hasta llegar al rojo intenso, de 6,5 a 7,0.

Figura 2. Distribución de la radiación solar en la zona andina



2.2 ANTECEDENTES

Desarrollo de la energía solar en Colombia

Las aplicaciones térmicas en Colombia datan de mediados del siglo pasado, Cuando en Santa Marta fueron instalados calentadores solares en las casas de los empleados de las bananeras, calentadores que aún existen aunque no operan. Más tarde hacia los años sesenta en la Universidad Industrial de Santander se instalaron calentadores solares domésticos de origen Israelí para estudiar su comportamiento. Posteriormente hacia finales de los sesenta y estimulados por la crisis del petróleo de 1973, instituciones Universitarias (La Universidad de los Andes, La Universidad Nacional de Bogotá, La Universidad del Valle entre otras) y fundaciones (como el Centro las Gaviotas) sentaron las bases para instalar calentadores solares domésticos y grandes sistemas de calentamiento de agua para usos en centros de servicios comunitarios (como hospitales y cafeterías). Algunos desarrollos tuvieron resultados bastante innovadores, y su máxima expresión fue hacia mediados de la década de los 80 en la aplicación masiva de calentadores en urbanizaciones de Medellín y Bogotá en donde fueron instalados miles de calentadores, desarrollados y fabricados por el centro Las Gaviotas.

El desarrollo alcanzado hasta 1996 indicaba que se habían instalado 48.901m² de calentadores solares, principalmente en Medellín y Bogotá y en barrios con financiación del Banco Central Hipotecario. Actualmente la Industria de calentadores solares en el país sigue estancada y a la espera de una nueva crisis de energía². Uno de los grandes proyectos realizados recientemente lo hizo la Compañía Nacional de Chocolates en el municipio de Rionegro Antioquia, su proyecto produce 2.132 KWp que el 15% de su cantidad total de consumo. En la Universidad Tecnológica de Pereira datan tesis de grado que referencian el aprovechamiento de la energía solar, uno de ellos llamado “La Energía Solar una Solución Ambiental” propone bombear agua con paneles de energía fotovoltaica en el departamento colombiano de la Guajira para el aprovechamiento de la comunidad, ya que es un territorio que presenta sequías extremas y contaminación por agentes industriales. En el techo del edificio de Facultad de Ingeniería Mecánica hay un colector solar de tubos de vacío instalado con fines experimentales por parte de la Escuela de Tecnología Mecánica.

² <https://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/a9%2028.pdf>

3.1 DEFINICIÓN Y DISEÑO PREVIO DEL COLECTOR SOLAR

Tubos y Placas

El colector plano, se disponen dos tubos horizontales y se conectan con varios tubos verticales. Cada uno de estos tiene acoplada una placa normalmente de lámina delgada. Las láminas sirven para captar el calor y transmitirlo por conducción a la tubería.

El arreglo de tubos se coloca horizontalmente sobre el suelo, con una inclinación específica dependiendo de la localidad terrestre. El agua entra por uno de los extremos del tubo horizontal más bajo, sube por todos los tubos verticales y sale por el extremo contrario del tubo horizontal más alto.

Serpentín

Una manguera o tubo se dispone en una formación de vaivén o espiral. La superficie expuesta al sol recibirá la energía directamente sobre el conducto.



Tubos de vacío

El colector utiliza tubos de vidrio al vacío. Dentro de los tubos se encuentran los conductos del colector. El vacío previene los fenómenos de conducción y convección, aumentando la eficiencia, pero también el costo.



3.2 DEFINICIÓN DE TIPO DE COLECTOR SOLAR

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los tipos de colectores solares ³

Colector de tubos de vacío	Colector de placa plana
El vacío protege el colector de la corrosión y no presenta condensaciones, esto les hace duraderos y fiables, con mantenimientos mínimos.	Son más proclives a presentar condensaciones, especialmente cuando se deteriora la junta entre el cristal y la caja, lo que da lugar a corrosiones, afectando el rendimiento y la durabilidad. El aislante de lana de roca comúnmente usado pierde eficacia con los años debido a las humedades del medio ambiente.
Están herméticamente cerrados entre dos cristales altamente resistentes de borosilicato con una cámara de vacío entre ellos, al estar aislados al vacío, así las pérdidas se reducen a valores en torno a un 5%, que suponen hasta un 35% menos con respecto a los paneles planos, lo que permite incrementar el rendimiento de forma notable, anunciándose incluso aumentos del 50% frente a los colectores planos.	Están contruidos dentro de una sólida estructura de metal debidamente aislada y protegida por un cristal. Sin embargo, al contener aire en su interior, presentan pérdidas de calor por convección y conducción, especialmente los días nublados, de frío o viento. Tienen rendimiento más bajo con respecto a los colectores de tubos de vacío.
Por la separación existente entre tubos, el viento circula libremente entre ellos haciendo estos colectores más resistentes a los vendavales, sin anclajes reforzados, particularmente	El fluido circula por el colector, siendo más propenso a la corrosión interna e incrustaciones, afectando el rendimiento y durabilidad. Este fluido puede llegar a congelarse, deteriorando

³ Comparación entre los colectores solares de placa plana, y de tubos de vacío.
http://www.sogaltecsolar.com/colectores_planos_o_tubos_de_vacio.htm

<p>cuando se montan en azoteas planas. Se conservan más tiempo limpios ya que acumulan menos polvo y suciedad.</p>	<p>el colector que deberá ser sustituido</p>
<p>Por la forma circular de los tubos, los rayos de sol son atrapados más eficazmente, entregando máxima potencia incluso con ángulos desfavorables para la captación de la energía solar.</p>	<p>Deben ser elevados al tejado e instalados como una sola unidad de gran peso y dimensiones, con los esfuerzos que conlleva.</p>
<p>Por su ligero peso y estructura modular, son más sencillos de instalar, especialmente en tejados inclinados. Se monta la ligera estructura y después los tubos, reemplazando un solo tubo en caso de rotura durante la instalación.</p> <p>Al no tener pérdidas por convección o conducción, alcanzan temperaturas elevadas y permiten su utilización en múltiples entornos.</p>	<p>Sólo entregan máxima potencia con los rayos del sol perpendiculares al colector (al mediodía). Esta potencia decrece durante las horas de sol de la mañana y la tarde.</p> <p>Por su diseño plano, acumulan polvo y suciedad, afectando su rendimiento y elevando los costes de mantenimiento. Se deben instalar más anclajes de seguridad en previsión de vendavales, particularmente si se montan en azoteas planas.</p>
<p>El agua no circula por los tubos, eliminando las corrosiones y las incrustaciones de las aguas. Evitando congelaciones y roturas del colector. No presentan apenas inercia, entregando calor desde el principio.</p>	<p>Debido a las pérdidas por convección y conducción, estos colectores tienen una curva de rendimiento muy desfavorable con temperaturas altas del fluido de trabajo, desaconsejando su uso para la calefacción por radiadores.</p>

Tabla 2. Comparación de precios de colectores solares comerciales

Tipo de Colector	Capacidad (l)	Precio	Distribuidor Local	Peso (kg)	Área (m²)
Placa Plana	90	\$1'400.000	Colombian Solar Systems	30	2
	80	\$1'300.000	Ecodiseño	28	1,9
Tubos de Vacío	100	\$1'450.000	Green Sunny	166	1,65
	150	\$1'650.000	Green Sunny	249	2,41
	80	\$1'250.000	Ajover	133	1,38
	130	\$1'495.000	Ajover	216	2,06
	180	\$1'800.000	Ajover	300	2,9

3.2 DISEÑO DEL COLECTOR SOLAR EXPERIMENTAL

- **Parámetros de diseño del colector**

De acuerdo a estos parámetros el colector indicado para construir sería el de tubos de vacío, pero debido a problemas con la falta de estandarización de éstos y a que constructivamente hablando el diseño de los tubos para la aplicación específica que se requiere en este trabajo caería en la fabricación de un nuevo tubo de vacío, lo que incurriría en un área más avanzada del desarrollo de este tipo de colectores (variación del diámetro, longitud del tubo y como varía eficiencia debido al cambio de estas dimensiones, además sería muy complejo encontrar un fabricante que construya estos tubos, y en caso de avería del alguno de estos, el remplazo sería complejo)

Por estas razones se eligió el colector solar de placa plana, el cual constructivamente es menos complejo, mantenimiento más accesible y componentes fácilmente reemplazables, así como menos costoso económicamente.

Con las tres ecuaciones siguientes según el Libro “**Elementos de Ingeniería Solar**” de Orozco se determinaron los parámetros constructivos de un colector de placa plana según el volumen que se desee calentar.

Ecuación 1. Flujo másico de un fluido (Agua).

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho$$

Ecuación 2. Calor útil del colector.

$$\dot{Q}_U = \dot{V} \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{sal} - T_{ent})$$

Ecuación 3. Eficiencia térmica del colector solar de placa plana.⁴

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A \cdot H}$$

⁴ Orozco Hincapié, Carlos Alberto. Elementos de Ingeniería solar. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Mecánica. Junio 30 de 1993.

- \dot{Q}_U = Calor útil en el colector.
- $T_{ent} = 19\text{ }^{\circ}\text{C}$; Temperatura del agua en la entrada del colector.
- $T_{sal} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$; Temperatura del agua a la salida del colector.
- $H = 441 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \cdot \text{día}}$; Energía recibida en el área colectora. [2]
- $C_p = 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$; Calor específico del agua.⁵
- A = Área del colector (m^2).
- $\eta = 50\%$; Eficiencia total del colector solar.⁶
- \dot{m} = Flujo de masa de trabajo en el colector.
- \dot{V} = Caudal de fluido de trabajo.
- $\rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$; Densidad del agua.

Radiación Solar media en el área de Pereira $441 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \cdot \text{día}}$

$$H = 441 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \cdot \text{día}} \cdot \frac{(100 \text{ cm})^2}{1 \text{ m}^2} \cdot \frac{4,186 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 18,46 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{día}}$$

El uso del colector solar será experimental por lo que se diseñara para flujo de trabajo que permita la movilidad y practicidad que se desea del equipo. La eficiencia del colector será asumida como del 50 % de acuerdo a la guía “**Colectores solares para agua caliente**” en donde se especifican los valores de eficiencia de las diferentes clases de colectores, y para este caso particular es un valor acorde al tipo de colector solar seleccionado y tomando en cuenta los materiales constructivos, acabados y demás detalles que influyen en el diseño.

Para un caudal $\dot{V} = 40 \frac{\text{l}}{\text{día}}$

Utilizando la ecuación 2. $\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho$

$$\dot{m} = 40 \frac{\text{l}}{\text{día}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

⁵ Calor específico, tabla de capacidades calóricas de diferentes sustancias, Cp agua líquida a 25 °C.

http://es.wikipedia.org/wiki/Calor_espec%C3%ADfico

⁶ Placco, Placco; Saravia, Luis; Cadena Carlos. Colectores Solares para agua caliente. INENCO, UNSa, CONICET. Salta 2010. http://www.inti.gob.ar/e-renova/pdf/colectores_solares_aguacaliente.pdf. Pág 6.

$$\dot{m}_1 = 40 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

Se reemplazó el valor de \dot{m}_1 en la ecuación 3.

$$\dot{Q}_U = \dot{V} \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{\text{sal}} - T_{\text{ent}})$$

$$\dot{Q}_U = 40 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \cdot 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (45-19)^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_U = 4347,2 \frac{\text{kJ}}{\text{día}}$$

Con el valor de \dot{Q}_U se calculará el área del colector despejando **A** de la ecuación 4.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_U}{A \cdot H}$$

$$A = \frac{\dot{Q}_U}{\eta \cdot H}$$

$$A = \frac{4347,2 \frac{\text{kJ}}{\text{día}}}{0,5 \cdot 18400 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \times \text{día}}}$$

$$A = 0,4725 \text{ m}^2 \text{ Área calculada para un colector de capacidad } 40 \frac{\text{l}}{\text{día}}.$$

Este problema ilustrativo se hizo para diferentes caudales de trabajo con el fin de determinar el área óptima constructiva que garantice la movilidad y practicidad del equipo (Equipo poco robusto, facilidad de mover de posición y entrar en espacios como salas y cuartos para ser exhibido). Los parámetros dimensionales de diferentes colectores se observan en la siguiente tabla.

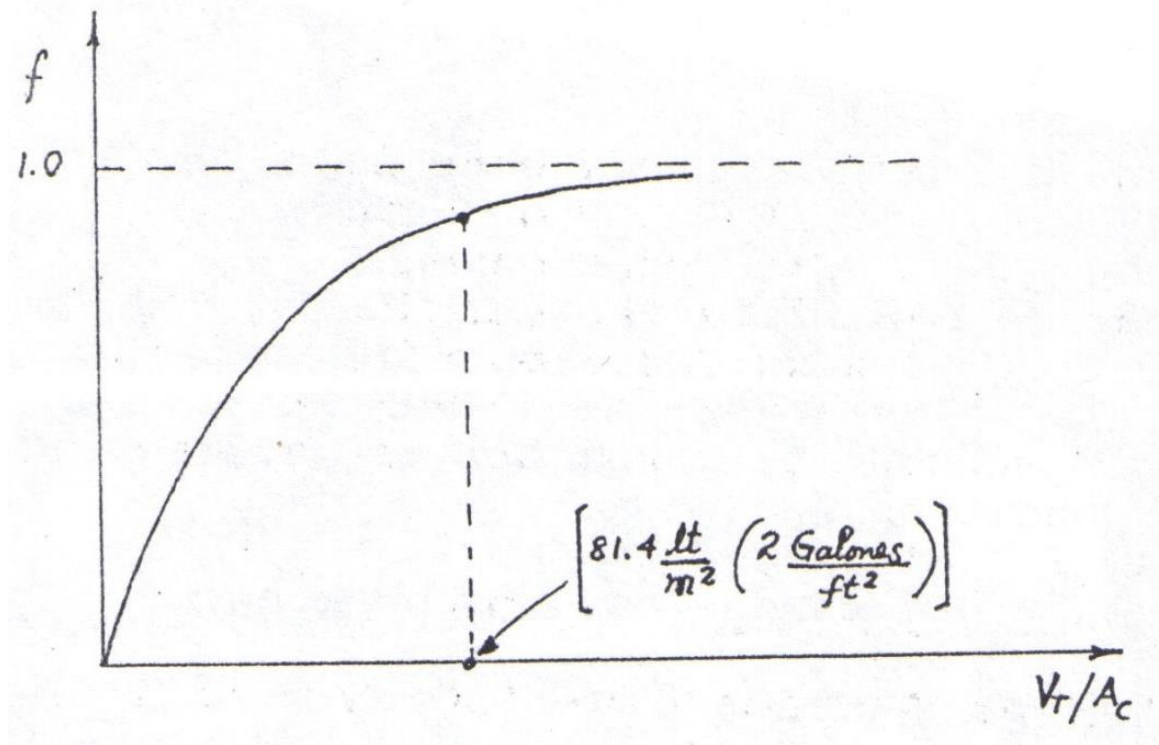
Tabla 3. Parámetros constructivos para diferentes capacidades de colectores solares de placa plana.

Capacidad del colector ($\frac{l}{\text{día}}$)	Área calculada del colector (m^2)	Área Aproximada del colector (m^2)	Dimensiones (m) (Ancho x Largo)
20	0,236	0,25	0,5 x 0,5
30	0,3543	0,35	0,5 x 0,7
40	0,4725	0,5	0,5 x 1
50	0,5906	0,6	0,6 x 1
60	0,7088	0,7	0,7 x 1
70	0,8269	0,85	0,85 x 1
80	0,945	0,95	0,95 x 1
90	1,063	1,1	1,1 x 1
100	1,181	1,2	1,1 x 1,1

Según las necesidades planteadas en la problemática, se escogerá el colector solar de placa plana de capacidad de **$40 \frac{l}{\text{día}}$** , área **$0,5 \text{ m}^2$** y dimensiones **$0,5 \text{ m} \times 1 \text{ m}$** .

Según el libro “**Elementos de Ingeniería Solar**” [2], la capacidad en general de los colectores solares de placa plana es **$80 \frac{l}{\text{m}^2}$** .

Ilustración 1. Criterio recomendado basado en la fracción de energía almacenada vs la relación Volumen/Área



$$V_t = 80 \frac{l}{m^2} \cdot 0,4725 m^2 \rightarrow V_t = 37,8 l$$

- Cálculo del diámetro del tanque.

Dónde:

- $V_t=38 l$; Volumen del tanque de almacenamiento.
- $D_t=$ Diámetro del tanque de almacenamiento.
- $L_t=50 cm$; Longitud del tanque de almacenamiento.

$$V_t = \frac{\pi (D_t)^2}{4} \times L_t \text{ Ecuación 5. Volumen del tanque de almacenamiento.}$$

$$D_t = \sqrt{\frac{4 \cdot 38 \text{ l} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}}}{\pi \cdot 0,5 \text{ m}}}$$

$$D_t = 0,31107$$

Para efectos prácticos en la construcción del tanque el diámetro D asume **$D_t = 32 \text{ cm}$** .

Recalculando el volumen del tanque.

$$V_t = \frac{\pi (0,32 \text{ m})^2}{4} \cdot 0,5 \text{ m}$$

$$V_t = 0,04021 \text{ m}^3 \quad \text{ó} \quad V_t = 40,21 \text{ l}$$

- **Cálculo del área exterior del tanque.**

$$A_t = 2 \cdot \frac{\pi (D_t)^2}{4} + \pi D_t L_t \quad \text{Ecuación 6. Área exterior del tanque.}$$

$$A_t = \frac{\pi (0,32 \text{ m})^2}{2} + \pi (0,32 \text{ m})(0,5 \text{ m})$$

$$A_t = 0,6635 \text{ m}^2$$

- **Recalculando el área del colector.**

Para recalculando el área del colector solar de placa plana se necesita determinar el coeficiente de pérdidas del tanque.

$$T_{\text{prom}} = \frac{T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}}}{2} \quad \text{Ecuación 7. Temperatura promedio a la salida del colector.}$$

- $T_{\text{máx}} = 45 \text{ °C}$; Temperatura máxima estimada a la salida del colector.
- $T_{\text{mín}} = 35 \text{ °C}$; Temperatura mínima estimada a la salida del colector.

$$T_{\text{prom}} = \frac{45 + 35}{2} \text{ °C} \quad \rightarrow \quad T_{\text{prom}} = 40 \text{ °C}$$

$$U_T = \frac{0,1 \cdot Q_{UA}}{A_t \cdot (T_{prom} - T_\alpha) \cdot 24 \text{ h}} \quad \text{Ecuación 8. Coeficiente de pérdidas del tanque.}$$

- $Q_{UA} = 1787,53 \text{ kJ}^7$
- $A_t = 0,6635 \text{ m}^2$; Área exterior del tanque.
- $T_{prom} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; Temperatura promedio del agua.
- $T_\alpha = 22 \text{ }^\circ\text{C}$; Temperatura del ambiente (Pereira).

$$U_T = \frac{0,1 \cdot 1787,53 \text{ kJ}}{0,6635 \text{ m}^2 \cdot (40 - 22)^\circ\text{C} \cdot 24 \text{ h}}$$

$$U_T = 623,632 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C h}} \quad \text{ó}$$

$$U_T = 623,632 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}$$

$$U_T = 0,17323 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C}} \quad \text{Coeficiente de pérdidas del tanque.}$$

Ahora se calculará las pérdidas de calor en el tanque.

$$Q_T = U_T A_T (T_f - T_\alpha) \quad \text{Ecuación 9. Pérdida de calor en el tanque.}$$

- $U_T = 0,17323 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C}}$; Coeficiente de pérdidas del tanque.
- $A_T = 0,6635 \text{ m}^2$; Área exterior del tanque.
- $T_f = 45 \text{ }^\circ\text{C}$; Temperatura final del agua dentro del tanque.
- $T_\alpha = 22 \text{ }^\circ\text{C}$; Temperatura del ambiente, Pereira.

$$Q_T = 0,17323 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C}} \cdot 0,6635 \text{ m}^2 \cdot (45 - 22)^\circ\text{C}$$

$$Q_T = 2,64357 \text{ W} \quad \text{Calor perdido en el tanque.}$$

⁷ Criterio de diseño ASHRAE, $t = 24$ horas y 10 % como factor estándar de pérdidas.

Pérdidas anuales en el tanque de almacenamiento.

$$\dot{Q}_T = 2,64357 \frac{\text{J}}{\text{s}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} \cdot 365 \frac{\text{día}}{\text{año}}$$

$$\dot{Q}_T = 83,3676 \frac{\text{MJ}}{\text{año}}$$

Calor útil en el colector solar

$$\dot{Q}_{UA} = \dot{m} C_p (T_f - T_0) \text{ Ecuación 10. Calor útil en el colector solar.}$$

- $\dot{m} = 40 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$; flujo másico del fluido de trabajo (agua).
- $C_p = 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$; Calor específico del agua.
- $T_f = 45^\circ\text{C}$; temperatura del agua a la salida del colector.
- $T_0 = 19^\circ\text{C}$; temperatura del agua a la entrada del colector.

$$\dot{Q}_{UA} = 40 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \cdot 365 \frac{\text{día}}{\text{año}} \cdot 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (45 - 19) \text{ K}$$

$$\dot{Q}_{UA} = 1586,728 \frac{\text{MJ}}{\text{año}}$$

Con los valores anteriormente determinados ya se recalculará el área del colector solar de placa plana.

$$A_c = \frac{\dot{Q}_{UA} + \dot{Q}_T}{\eta_H} \text{ Ecuación 1. Área del colector recalculada de acuerdo al calor útil en el colector y el calor perdido en el tanque de almacenamiento.}$$

$$A_c = \frac{1586,728 \frac{\text{MJ}}{\text{año}} + 83,3676 \frac{\text{MJ}}{\text{año}}}{0,5 \cdot 18,4 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \times \text{día}} \cdot 365 \frac{\text{día}}{\text{año}}}$$

$$A_c = 0,497348 \text{ m}^2 \text{ Área recalculada del colector solar.}$$

Como puede observarse el área del colector recalculada es similar al cálculo del área sin tener en cuenta las pérdidas en el tanque. Por lo tanto no existe necesidad de modificar las dimensiones del colector.

CAPITULO 4.

4.1 MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL COLECTOR SOLAR

Para el cálculo de los parámetros de funcionamiento del colector solar, se siguió la metodología citada por el libro **“ENERGÍA SOLAR, Fundamentos y aplicaciones fototérmicas”**.⁸

- Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor (U_L).

$$U_L = U_t + U_b + U_i \quad \text{Ecuación 12. Coeficiente global de transferencia de calor.}$$

- Cálculo de la pérdida de calor por la parte inferior del colector (U_i).

$$U_i = \frac{K_{ais}}{X_{ais}} \quad \text{Ecuación 13. Coeficiente de pérdidas en la parte inferior del colector.}$$

$K_{ais} = 0,026 \frac{W}{m \cdot K}$; Conductividad térmica del aislante térmico (Espuma de poliuretano).

$P_{ais} = 70 \frac{kg}{m^3}$; Densidad del aislante térmico.⁹

$X_{ais} = 40 \text{ mm } \text{ ó } 0,04 \text{ m}$; Espesor del aislante térmico, Recomendación del libro **“Elementos de Ingeniería Solar [2]”**.

$$U_i = \frac{0,026 \frac{W}{m \cdot K}}{0,04 \text{ m}} = 0,65 \frac{W}{m \cdot K}$$

⁸ Manrique, José A. ENERGÍA SOLAR, Fundamentos y aplicaciones fototérmicas. Editorial HARLA, Harper & Row latinoamericana; 1984 México.

⁹ Incropera, Frank P; DeWitt, David P. Fundamentos de transferencia de calor. Editorial Prentice Hall. Cuarta Edición. School of Mechanical Engineering, Purdue University. México, 1999.

- Cálculo del coeficiente de pérdidas hacia los lados (U_b).

$$U_b = \frac{K_{ais}}{X_{ais}} \cdot \frac{A_b}{A_c} \quad \text{Ecuación 2. Coeficiente de pérdidas hacia los lados.}$$

$X_{ais} = 25 \text{ mm } \text{ ó } 0,025 \text{ m}$; Espesor lateral del aislante térmico “Elementos de energía Solar [2]”.

$A_b = 0,00136665 \text{ m}^2$; Área transversal del aislante térmico en los costados del colector.

$A_c = 0,5 \text{ m}^2$; Área de la placa colectora

$$U_b = \frac{0,026 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}}{0,025 \text{ m}} \cdot \frac{0,00136665 \text{ m}^2}{0,5 \text{ m}^2} = 0,0028426 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

- Cálculo del coeficiente de calor hacia arriba (U_t).

$$U_t = \left[\frac{1}{h_{cpc} + h_{rpc}} + \frac{1}{h_w + h_{rsc}} \right]^{-1} \quad \text{Ecuación 3. Coeficiente de pérdidas de calor hacia arriba.}$$

✓ Coeficiente de convección de la placa – cubierta (h_{cpc}).

$$H_{cpc} = \frac{N_u \cdot K_{air}}{L} \quad \text{Ecuación 4. Coeficiente de convección entre placa-cubierta.}$$

$K_{air} = 0,027883 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$; Conductividad térmica del aire “Fundamentos de Transferencia de Calor” [7].

$L = 0,025 \text{ m } \text{ ó } 25 \text{ mm}$; Distancia entre la placa de absorción y la cubierta “Elementos de Ingeniería Solar” [2].

N_u = Número de Nusselt

Para el cálculo del número de **Nusselt** se necesitan varios parámetros asumidos y corroborados de tablas de libros como “Fundamentos de Transferencia de Calor” [7].

Temperatura promedio del colector.

Esta temperatura está definida como el promedio de temperatura en algunas partes del colector, Placa de absorción y caja.

$$T_{\text{prom}} = \frac{T_p + T_c}{2} \quad \text{Ecuación 5. Temperatura Promedio en el colector solar.}$$

$T_p = 321,15 \text{ K}$ ó $48 \text{ }^\circ\text{C}$; Temperatura de la placa colectora “Asumida”.

$T_c = 305,15 \text{ K}$ ó $32 \text{ }^\circ\text{C}$; Temperatura de la cubierta (vidrio), recomendación basada en el libro “Elementos de Ingeniería Solar” [2].

$$T_{\text{prom}} = \frac{(321,15 + 305,15) \text{ K}}{2} = 313,2 \text{ K}$$

Propiedades del aire seco a $50 \text{ }^\circ\text{C}$ “Fundamentos de transferencia de calor” [7].

$K_{\text{air}} = 0,027883 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$; Conductividad térmica del aire.

$P_{\text{air}} = 1,1685 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$; Densidad del aire.

$C_{p_{\text{air}}} = 1005,69 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$; Calor específico del aire.

$B = 0,0030945 \frac{1}{\text{K}}$; Coeficiente de expansión térmico del aire.

$V = 0,00001822 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$; Viscosidad cinemática del aire.

$$A = \frac{K_{\text{air}}}{P_{\text{air}} \cdot C_{p_{\text{air}}}} \quad \text{Ecuación 6. Difusividad térmica del aire.}$$

$$A = \frac{0,027883 \frac{W}{m \cdot K}}{1,11685 \frac{kg}{m^3} \cdot 1005,69 \frac{J}{kg \cdot K}} = 0,00002482 \frac{m^2}{s}$$

Cálculo del número de Rayleigh.

Para la determinación del número de **Nusselt** entre placas paralelas entre (0 y 75) °C, se efectúa inicialmente el cálculo del número de **Rayleigh** para demostrar que el valor de este sea menor a 10^5 .

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_p - T_c) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad \text{Ecuación 7. Número de Rayleigh}$$

$g = 9,81 \frac{m}{s^2}$; Gravedad en el Sistema Internacional.

$$Ra = \frac{9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,0030945 \frac{1}{K} \cdot (321,15 K - 305,15 K) \cdot (0,025 m)^3}{0,00001822 \frac{m^2}{s} \cdot 0,00002482 \frac{m^2}{s}}$$

$$Ra = 16779 < 10^5$$

El número de **Rayleigh** es menor a lo previsto por lo que el cálculo de número de **Nusselt** se prosigue mediante la siguiente expresión.

$$Nu = 1 + 1,44 \cdot \left[1 - \frac{1708}{Ra \cdot \cos \Sigma} \right]^+ \cdot \left[1 - \frac{(\sin 1,8 \cdot \Sigma)^{1,6}}{Ra \cdot \cos \Sigma} \right] + \left[\left(\frac{Ra \cdot \cos \Sigma}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^+$$

Ecuación 8. Número de Nusselt

$\Sigma = 5^\circ$; Inclinación de la placa de absorción del colector solar.

$$N_u = 1 + 1,44 \cdot \left[1 - \frac{1708}{16779 \cdot \cos(5^\circ)} \right]^+ \cdot \left[1 - \frac{(\sin 1,8 \cdot (5^\circ))^{1,6}}{16779 \cdot \cos(5^\circ)} \right] + \left[\left(\frac{16779 \cdot \cos(5^\circ)}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^+$$

$$N_u = 1,29$$

Con el número de **Nusselt** calculado ya se puede establecer el coeficiente convectivo entre la placa y la cubierta (h_{cpc}) utilizando la ecuación 15.

$$H_{cpc} = \frac{1,29 \cdot 0,027883 \frac{W}{m \cdot K}}{0,025 m} = 1,439 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

✓ **Coeficiente de radiación entre la placa – cubierta (h_{rpc}).**

$$H_{rpc} = \epsilon_p \cdot \sigma \cdot \left[\frac{T_p^4 \cdot (1 - \rho_{c,60^\circ}) - \epsilon_c \cdot T_c^4}{(1 - \rho_p \cdot \rho_{c,60^\circ}) \cdot (T_p - T_a)} \right]$$

Ecuación 9. Coeficiente de radiación entre placa y cubierta.

$E_p=0,84$; Emisividad de la placa de absorción de Aluminio.

$E_c= 0,82$; Emisividad de la cubierta (Vidrio).

$\Sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$; Constante de Stefan-Boltzmann. “Fundamentos de transferencia de Calor” [7].

$P_{c,60^\circ}$ =Reflectancia de la cubierta.

P_p = Reflectancia de la placa colectora.

$T_p= 48^\circ C$; Temperatura de la placa de absorción.

$T_c=32^\circ C$; Temperatura de la cubierta.

$T_a=22^\circ C$; Temperatura promedio del ambiente en Pereira.

- **Cálculo del factor de eficiencia F'**

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left(\frac{1}{U_L [D + (W - D)]} + \frac{1}{\pi D_i h_f} \right)}$$

$$F = \frac{\tanh\left(\frac{m(W - D)}{2}\right)}{\frac{m(W - D)}{2}}$$

$$m^2 = \frac{U_L}{k \delta}$$

Dónde:

W = Distancia entre los centros de los canales (m).

D = Ancho de los canales (m).

D_i = Diámetro hidráulico del canal (m).

h_f = Coeficiente de transferencia de calor por convección hacia el fluido ($\frac{W}{m^2 K}$).

δ = Espesor de la aleta (m).

- **Determinación del factor de remoción de calor (F_R).**

Factor de remoción de calor (F_R).

Este factor relaciona el calor útil que se obtiene efectivamente en el colector con el que se obtendría si toda la superficie del mismo se encontrara a la temperatura de entrada del fluido (T_{fe}), y estando definida por la siguiente expresión.

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p (T_{fs} - T_{fe})}{A_c [S - U_L (T_{fe} - T_a)]}$$

$$S = I (\tau\alpha)$$

Dónde:

\dot{m} = Masa

- **Cálculo del calor útil (Q_u), y la eficiencia η .**
- **Verificación de la temperatura de la placa de absorción (\bar{T}_p).**

4.2 SELECCIÓN DE MATERIALES DEL COLECTOR

Caja

Es el elemento encargado de absorber la energía disponible del sol y transformarla en energía térmica para luego ser transferida al agua, generalmente está hecha de un metal (cobre, acero, aluminio, etc.). Las normas técnicas colombianas *NTC 4368* y *NTC 2461*, establecen que la placa de absorción deberá fabricarse en materiales que posean una conductividad térmica mayor a $125 \frac{W}{m^{\circ}C}$ y una absorptancia mayor a 0,9 y además, debe estar fabricada de acero, cobre o aluminio, y su espesor mínimo es 0,5 mm, 0,2 mm ó 0,4 mm respectivamente según el material.

De acuerdo con los criterios dados por la *NTC 4368*, el material que se utilizará será lámina galvanizada **calibre 18** (Espesor = 1,2 mm), la cual además de tener un costo moderado presenta mejores propiedades para ser trabajada (doblada y soldada). A nivel comercial esta lámina se encuentra en 2 dimensiones distintas 1 x 2 m o 1,22 x 2,44 m.

De acuerdo a la dimensión del área de la placa de absorción, bastará con una sola lámina de 1 x 2 m cuyo peso es 20,4 kg, con la utilización de una sola lámina se evita un proceso de mayor manufactura.

Aislante.

Es el punto básico para disminuir las pérdidas de calor por conducción en la parte inferior y lateral del colector. Las características que debe poseer el material utilizado para ser un buen aislante son:

- No debe deteriorarse, gasificarse o vaporizarse a temperaturas alrededor de los 200°C.
- Resistencia a la repetición de los ciclos térmicos entre 35 °C y 120 °C.
- Baja conductividad térmica (menor de $0,040 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ en el rango de 20 a 120 °C).
- No debe desplomarse, compactarse o adherirse cuando se repiten los ciclos térmicos y de humedad y no debe absorber o retener agua.

El material que utilizará como aislante en el colector será espuma de poliuretano la cual es un material de fácil consecución, bajo costo y el trabajo con la misma es sencillo.

A nivel comercial se encuentra de tres formas distintas.

- Láminas preformadas con dimensiones específicas.
- Spray expandible.
- Químicos base para ser mezclados

Para este caso particular se utilizarán las láminas preformadas con dimensiones aproximadas al área requerida según el diseño.

Las características promedio del poliuretano son:

$$\text{Densidad} = 70 \frac{kg}{m^3} \qquad \text{Conductividad térmica } k = 0,026 \frac{W}{m \cdot K}$$

El espesor que se utilizará en la parte inferior del colector es de 4 cm, mientras que el espesor que se utilizará en los laterales será de 2,5 cm. Estos dos valores se han obtenido teniendo en cuenta las dimensiones de la caja, las necesidades a cubrir y los modelos desarrollados anteriormente.

Cubierta.

Es una lámina de material transparente montada en frente del absorbedor, en la parte superior del colector, creando un espacio (2 a 2.5 cm), entre la placa y ella. La función de la cubierta es permitir el paso de la radiación solar absorbida por la placa, igualmente disminuye la cantidad de radiación infrarroja que se escapa al exterior, disminuyendo de esta forma las pérdidas del colector. Tomando en cuenta estas funciones, el material utilizado en la cubierta debe poseer las siguientes características:

- Elevada transmitancia dentro del espectro solar.
- Baja transmitancia para longitudes de onda largas (mayores a $3\ \mu\text{m}$).
- Elevado índice de reflexión.
- Índice de absorción en cualquier longitud de onda.
- Excelente resistencia al impacto, a la degradación química, a la degradación por exposición prolongada a la luz solar y a los esfuerzos ambientales por contacto con la lluvia, contaminantes atmosféricos, medios utilizados para su limpieza o cualquier otro agente ambiental (granizo etc) que genere esfuerzos sobre la cubierta.
- Resistencia a los choques térmicos severos.

Si se desea agua entre $20 - 30\ ^\circ\text{C}$ no se requiere colocar ninguna cubierta, lo que es apropiado para el calentamiento de agua en piscinas. Si se requiere agua entre $30 - 55\ ^\circ\text{C}$ es mejor utilizar un cristal, y si se requiere agua entre $55 - 100\ ^\circ\text{C}$ se necesitará colocar dos cristales o usar una superficie selectiva y un cristal.¹⁰

Para este caso particular se necesitará solo un cristal. A continuación en la tabla 4 se muestra las propiedades mecánicas del vidrio del colector solar

¹⁰ OROZCO HINCAPIÉ, Carlos Alberto. "Elementos de Ingeniería Solar"; Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Mecánica. Primera Edición Junio 30 de 1993.

Tabla 4. Propiedades mecánicas y térmicas de la cubierta del colector solar.

Densidad	$2500 \frac{kg}{m^3}$
Dureza (Ensayo norma ISO 9385)	470 HK
Resistencia a la compresión	800 – 1000 MPa
Resistencia a la flexión	45 MPa
Módulo de elasticidad	70000 MPa
PROPIEDADES TÉRMICAS	
Rango de transformación	520 – 550 °C
Temperatura para su emblandecimiento	aprox. 600 °C
Calor específico	$0,8 \frac{J}{g K}$
Conductividad térmica	$0,8 \frac{W}{m K}$
PROPIEDADES ÓPTICAS	
Índice de refracción	$n = 1,52$

Fuente: SAINT-GOBAIN SEKURIT, Propiedades del vidrio (online); disponible en: <http://www.saint-gobain-sekurit.com/es/glazingcatalogue/propiedades-del-vidrio>.

Sello térmico.

La completa hermeticidad del colector se consigue con un perfil que rellene las juntas, como un buen sellador, el cual debe cumplir con las siguientes características:

- Resistencia a la radiación ultravioleta y a la intemperie.
- No volverse quebradizo ni endurecerse.
- Buena adhesión con las distintas superficies y materiales.
- Resistencia a la repetición de los ciclos térmicos y estirarse y comprimirse en forma adecuada para soportar las dilataciones y contracciones debidas a la diferencia entre los coeficientes de dilatación térmica de los elementos (caja de lámina galvanizada y cubierta de vidrio claro plano).

El material seleccionado es una masilla elástica sellante y adhesiva de un componente, con base en poliuretano que en el mercado se encuentra con el nombre de **SIKAFLEX-1A** el cual cumple con todos los requerimientos anteriormente mencionados y tiene un bajo costo.

Tabla 5. Propiedades del sello térmico del colector solar

Curado a 20 °C y 50% de humedad relativa	
Deformación máxima admisible	35% del ancho promedio de la junta
Tensión a la máxima elongación	$12.3 \frac{kg}{cm^2}$, aprox
Dureza Shore a 21 días	40 +/- 5
Secado al tacto	3 horas
Velocidad del curado	$1 \frac{mm}{día}$, aprox
Curado final	4 - 7 días
Densidad	$1,20-1,30 \frac{kg}{l}$
Profundidad mínima en juntas con movimiento	8 mm
Profundidad máxima	13 mm
Temperatura de aplicación	5 – 36 °C
Temperatura de servicio	-40 – 75 °C
Propiedades a tensión ASTM D 412 a 21 días	
Elongación a la rotura 550%	
Módulo de elasticidad: 25% 0.24 MPa / 35 PSI; 50% 0.41 MPa / 60 PSI; 100% 0.59 MPa / 85 PSI.	

http://col.sika.com/es/solutions_products/02/02a008/02a008sa04.html

Placa de absorción y conductos de circulación del agua.

Es la parte más importante del colector, ya que no solo se debe seleccionar el material sino también la configuración que deben tener los conductos con el fin de buscar una mayor eficiencia.

El colector solar de placa plana debe poseer una serie de conductos por los cuales circula el fluido de trabajo, el cual recibe y transporta la energía absorbida por la placa hacia el tanque de almacenamiento. Existen dos formas de circulación del fluido, de Serpentin o de tubos colectores e igualmente existen diversas formas de disposición de la unión placa-conductos.

Tabla 6. Propiedades y Valores del aluminio.

Propiedad	$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	$C \left(\frac{J}{kg K} \right)$	$K \left(\frac{W}{m K} \right)$	$\alpha \left(\frac{m^2}{s \times 10^6} \right)$
Valor	2702	903	237	97,1

Fuente: Incropera, Frank P. Fundamentos de transferencia de calor.

Tanque de Almacenamiento.

El calor puede ser almacenado en el tanque por circulación directa entre el colector y el tanque o el agua calentada en el colector puede circular por un serpentín dentro del tanque, transfiriendo así calor al agua que se encuentra dentro del mismo. El mayor requerimiento técnico del tanque es su total aislamiento, con el fin de conservar la temperatura requerida en el agua. Debe cumplir con las siguientes especificaciones:

- Evidenciar sellamiento, aislamiento y todas las precauciones de intemperismo.
- No deben ocurrir fugas de agua ni de vapor de agua.
- Debe poder operar a presiones de red de distribución de acueducto y debería ser ensayado a 200 psi o 1378200 Pa durante 5 horas, esto según el documento “Guía de especificaciones de sistemas de calentamiento de agua para uso doméstico con energía solar en Colombia”.
- Disponer de los elementos que alivien al tanque y sus circuitos asociados de sobrepresiones originadas en golpes de presión de red hidráulica, adicionada a la presión por dilatación térmica del agua.
- La ubicación del tanque es importante, ya que, de ésta, depende la eficiencia del termosifón y el evitar el fenómeno de flujo inverso.

La determinación del espesor de la pared del tanque está dada por la siguiente expresión:

$$t = \frac{P D}{2 \sigma_c} = \frac{1378200 Pa \cdot 0,33 m}{2 \times 240 \times 10^6 \frac{N}{m^2}} = 0,00947 m \text{ ó } 0,94 mm$$

Se toma en cuenta solo el esfuerzo circunferencial σ_c , ya que este es el mayor en recipientes de pared delgada y debido al cual se pueden presentar fallas. Teniendo en cuenta el resultado obtenido se escogerá una lámina negra de acero calibre 18 (**1,2 mm** de espesor), para la parte interior del tanque, y para la parte exterior de este se usará una lámina de acero galvanizado de calibre 22 (**0,7 mm** de espesor) el recubrimiento del tanque interior será espuma de poliuretano.

Dimensiones y ubicación del tanque.

La forma del tanque será cilíndrica y las dimensiones del mismo serán las calculadas anteriormente:

$L = 0,5 \text{ m}$; Longitud del tanque de almacenamiento.

$D = 0,33 \text{ m}$; Diámetro del tanque de almacenamiento.

$V = 0,043 \text{ m}^3$; Volumen del tanque de almacenamiento.

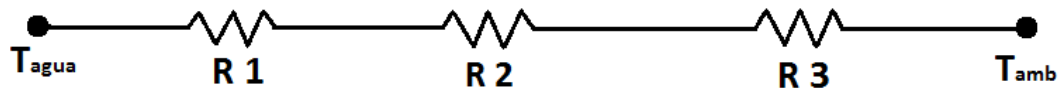
$A = 0,6894 \text{ m}^2$; Área exterior del tanque

Espesor del aislante.

La determinación del espesor del aislante se hará de acuerdo al coeficiente de pérdidas en el tanque:

$$U_T = 0,1667 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Las pérdidas del tanque se producen solo por conducción a través de la paredes, lo cual se puede se puede representar por el siguiente circuito térmico que aparece en la figura X



Circuito térmico tanque - exterior

Dónde:

R_1 = Resistencia térmica por conducción de la pared interior.

R_2 = Resistencia térmica por conducción del aislante.

R_3 = Resistencia térmica por conducción de la pared exterior.

Debido a la alta conductividad térmica de las placas interna y externa del tanque hechas en acero, la resistencia térmica de estas se hace despreciable. Por lo tanto solo se tendrá en cuenta la resistencia térmica del aislante térmico (Espuma de poliuretano).

$$U_T = \frac{1}{R_2} = \frac{k_{ais}}{X_{ais}}$$

Entonces el espesor del aislante será:

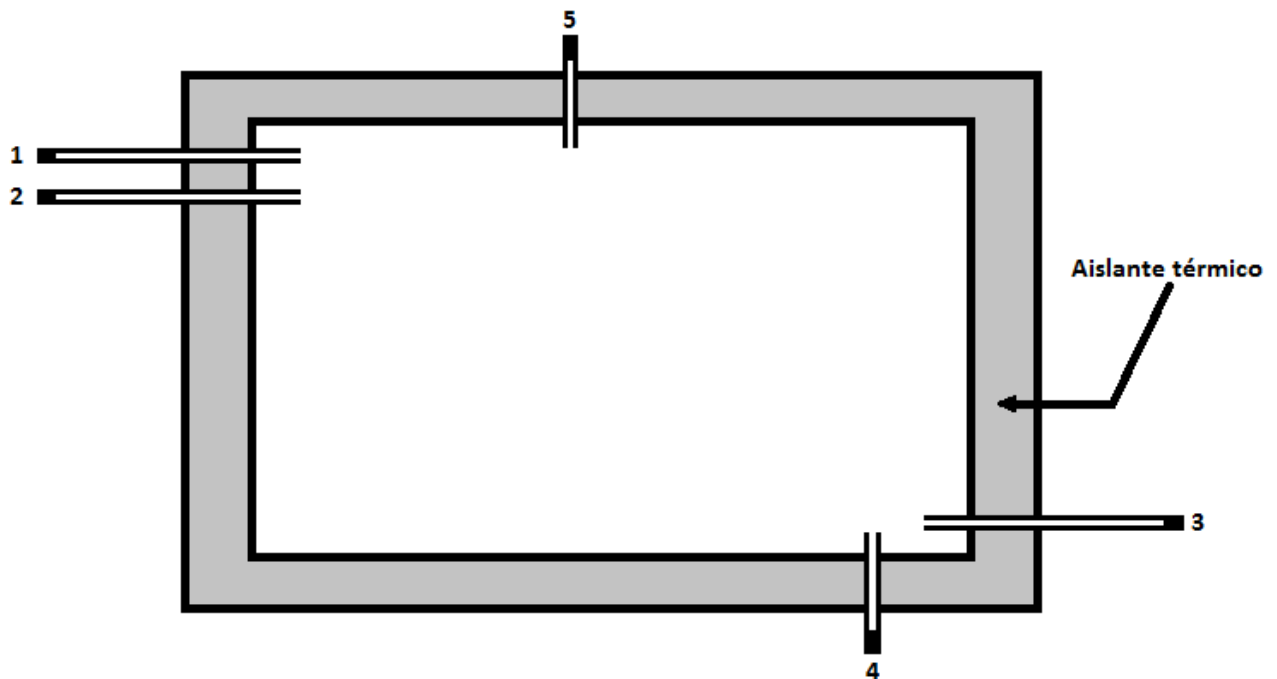
$$X_{ais} = \frac{k_{ais}}{U_T} = \frac{0,026 \frac{W}{m^{\circ}C}}{0,1667 \frac{W}{m^2^{\circ}C}} = 0,156 m$$

El espesor del aislante térmico será entonces de $X_{ais} = 16 cm$.

Entradas y salidas de agua del tanque.

El tanque de almacenamiento debe tener dos entradas de agua, una del sistema de acueducto y otra del sistema del colector, e igualmente 2 salidas una hacia el colector y otra hacia el lugar al cual se la va a dar uso (ducha, cocina, etc).

Secciones transversales del tanque acumulador (Entradas y salidas).



- 1 Salida de agua caliente del tanque acumulador.
- 2 Entrada de agua caliente al tanque acumulador proveniente del colector.
- 3 Entrada de agua fría al tanque acumulador.
- 4 Salida de agua fría del tanque acumulador hacia el colector.
- 5 Salida para ubicar una válvula de alivio de presión, recomendada por "Guía de especificaciones de sistemas de calentamiento de agua para uso doméstico con energía solar en Colombia.

4.3. CONSTRUCCIÓN DEL COLECTOR SOLAR

4.3.1. Proceso de construcción de las partes que componen el colector:

Caja: Se empezó cortando las láminas que forman la caja en el Taller de la Facultad de ingeniería Mecánica en la máquina cortadora y posteriormente las láminas resultantes fueron articuladas en el taller.

Imagen 4.3.1. Perforaciones para remachar y unir las láminas que constituirán la caja



Imagen 4.3.2. Corte de la lámina de la que está hecha la caja.



Serpentín y Placa-Serpentín: Ya que esta parte del colector requiere de soldadura a lo largo de tubos y con un par de placas de aluminio

Imagen 4.3.3. Soldando los tubos del serpentín de aluminio.



Imagen 4.3.4. Una placa soldada al serpentín.

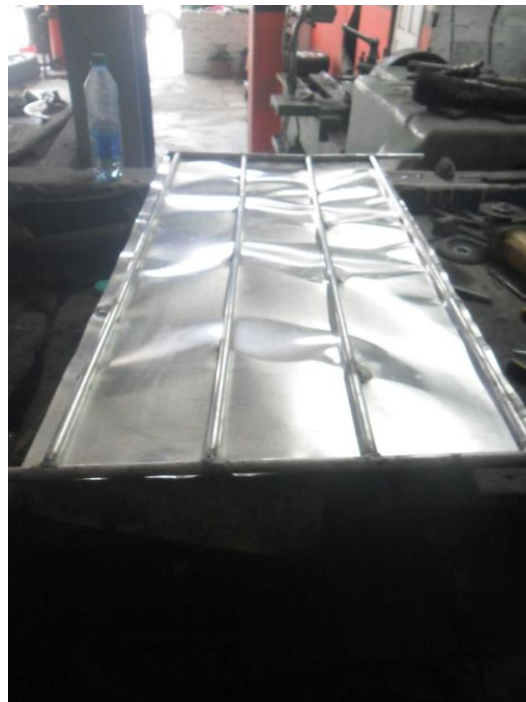


Imagen 4.3.5. Soldadura final de serpentín y placas



Tanque: El tanque es un recipiente de plástico el cual fue perforado con herramienta automática de perforación conforme a los ductos de entrada y salida de agua. Para el primer llenado con el fluido de trabajo se agregó el agua por la parte de arriba del tanque.

Estructura: Con una serie de barras calibre N°3" cortadas en el sitio donde se las compró, posteriormente fueron soldadas en el taller de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

Imagen 4.3.6. Proceso de soldadura de la estructura



Imagen 4.3.7. Construcción de estructura



Ensamble: A continuación se muestran algunas imágenes del ensamble.

Imagen 4.3.8. Ensamblando la caja con el aislante.



Imagen 4.3.9. Placas pintadas de color negro mate



En el siguiente capítulo se describe la parte final de la construcción que involucra la instrumentación.

Tabla 7. Parámetros del colector solar

DIMENSIONES ELEMENTALES DEL COLECTOR SOLAR	
Volumen del tanque	43 l
Área del colector solar	0,5 m²
Ancho y largo	0,5 m X 1 m
Diámetro y longitud del tanque recolector	0,32 m X 0,5 m

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	
Material de la caja	Lámina galvanizada de calibre 18 (1,2 mm); comercialmente se consigue en tamaños de 1 x 2 m
Aislante térmico	Espuma de poliuretano, densidad 70 kg/m³ y una conductividad térmica 0,06 W/m K
Cubierta	Vidrios transparente de 4 ó 5 mm de espesor
Sello térmico	Masilla elástica Sikaflex 1-A, sellante y adhesiva con base en poliuretano
Placa de absorción y conductos de circulación de agua	Placa de Aluminio de 0,5 mm de espesor; 4 conductos separados 15 cm tipo sandwich con platinas de 3 a 5 mm. Aleación de Aluminio 1A 8112 H14
Material de construcción del tanque colector	Acero de lámina galvanizada calibre 22 (7 mm)
Tanque exterior	Se utilizará el mismo acero del tanque interior
Aislante térmico entre los tanques externo e interno	Espuma de poliuretano con un espesor de 16 cm

5. INSTRUMENTACIÓN

Los instrumentos de medición que se utilizaron en el colector solar de placa plana son un Piranómetro y unas termocuplas ubicadas en la entrada de agua, al final del recorrido del circuito, y en un punto cualquiera para medir la temperatura del aire.

Imagen 5.1. Piranómetro



Imagen 5.2 Termocupla



CAPÍTULO 6.

6.1 PRUEBAS REALIZADAS AL EQUIPO

Al inicio de las pruebas la instrumentación no se logró empezar desde las primeras horas del luz solar de aquel día, hubo que realizar ajustes en el código de arduino ya que no corría adecuadamente y los datos eran erráticos por lo que se empezaron las pruebas el día 12 de noviembre del a las 9 am en el bloque L de la Universidad Tecnológica de Pereira. En las primeras horas de actividad del colector estuvo funcionando acorde a lo esperado, pero a medida que el agua incrementaba su temperatura mediante el proceso de transferencia de calor, las fugas internas iban siendo mucho más notorias tal como se observa en la imagen 1. El clima estuvo bastante nuboso con luz solar directa intermitente durante toda la jornada de pruebas del colector solar, eso provocó que la temperatura ganada por el agua se disipara fácilmente, y además, teniendo en cuenta que el tanque de almacenamiento y las tuberías externas no están cubiertas por aislante térmico, hizo que las pérdidas de calor fueran incontenibles. A medida que el agua se desalojaba del colector para compensar la cabeza hidráulica, hubo que hacer rellenos con agua del grifo a la temperatura que entrega el acueducto.

Imagen 6.1.1. Colector Solar y evidencia de fugas internas.



Se hicieron adiciones de agua del grifo debido a las pérdidas por fugas, durante toda la sesión a medida que bajaba la cabeza hidráulica de los ductos de entrada y salida del tanque. Así se sostuvo el funcionamiento del equipo durante la jornada de prueba

Imagen 6.1.2. Evidencia de fugas



Imagen 6.1.3. Estructura metálica



Imagen 6.1.4. Instrumentación, piranómetro y arduino.

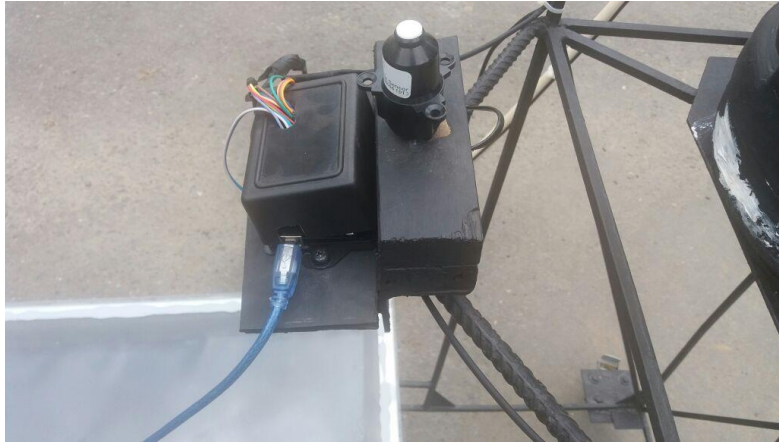


Imagen 6.1.5. Foto panorámica del colector solar.



6.2. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Las principales problemáticas manifestadas a lo largo del proyecto fueron las que conciernen a lo constructivo entre las placas y el serpentín, ya que en las siguientes dificultades se producen como consecuencia de los errores constructivos en estos.
- En lo referente al sistema de placas y red de tubos, que fue donde se presentó mayor dificultades por las características propias de la soldadura de aluminio, la tubería (pared muy delgada) y del calibre de la placa (n°26), se hicieron múltiples pruebas vertiendo agua fría para verificar si existían fugas; Inicialmente no se observaron, sin embargo, en las pruebas finales del proyecto se evidenciaron significativas fugas internas.
- Para prevenir esta situación se recomienda probar el sistema placas y tuberías con agua caliente, ya que la viscosidad del agua baja con la temperatura y la penetrabilidad por grietas es más alta, además esto tiene en cuenta el hecho de que el sistema se va a enfocar en trabajar principalmente con agua caliente. Otra solución son los productos químicos reveladores de fisuras que hay en el mercado, con la aplicación de estos las fugas son ubicadas y selladas con una masilla epóxica del mercado. También se puede probar el sistema placas-tuberías haciendo fluir agua impulsada por una bomba; esto aumentaría la presión interna del sistema y podrá revelar fugas o puntos débiles de soldadura. Dado el caso de encontrar fugas en el sistema de tuberías se recomienda aplicar adhesivos industriales y darle solución definitiva al problema de la fugas, cuya importancia fue clave a la hora de realizar las pruebas finales, ya que un sistema con fugas en un colector solar implicará adicionar agua fría para compensar las pérdidas volumétricas, afectando la temperatura ganada mediante la transferencia de calor de las placas y tubos al agua, es decir, que la temperatura ganada se reducirá por compensación volumétrica. Por lo anterior, el registro de mayor temperatura que se tomó con las termocuplas logrado por el sistema con fugas es menor que la temperatura que se puede alcanzar en este mismo sistema sin fugas. Las fugas hacen que este sistema baje su eficiencia.
- El tanque de almacenamiento y las tuberías externas no tienen aislante térmico, por lo tanto a través de ellos se escapa el calor ganado por el agua. También entra parte de la radiación solar a calentar el agua dentro del tanque, lo cual

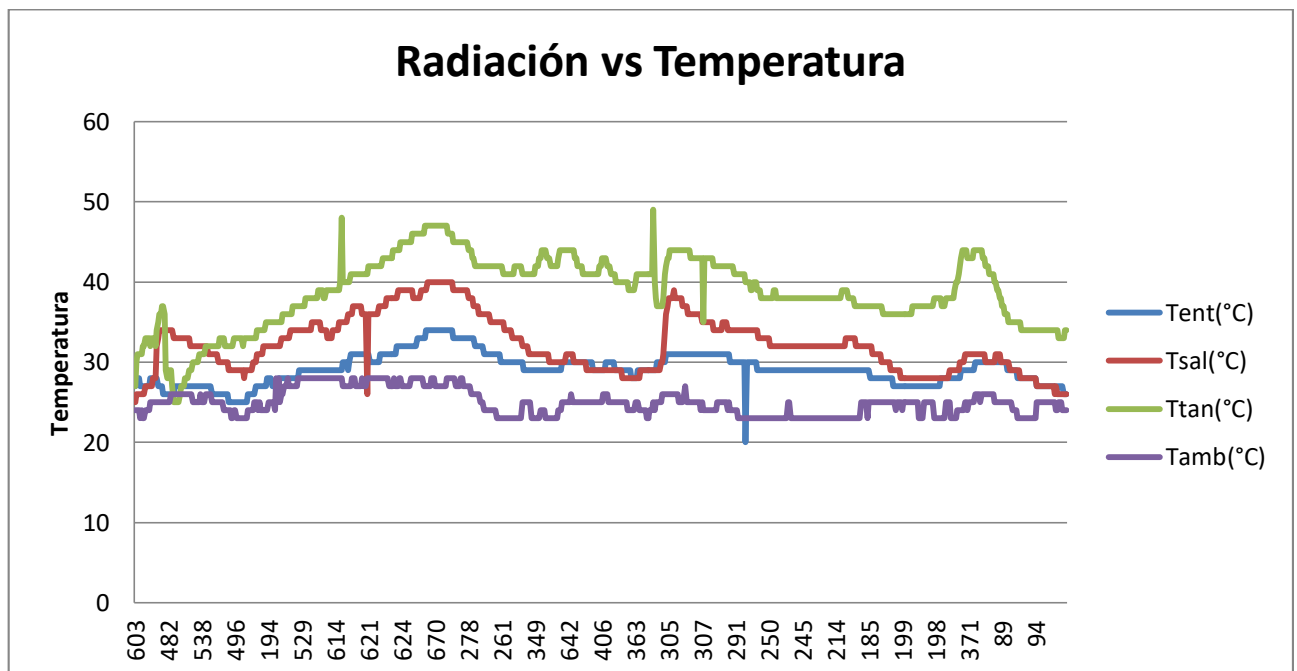
hace que la temperatura que se cense se sensible a variaciones de radiación directa en el agua almacenada en el tanque. Se recomienda usar aislante térmico ya que no sólo va a garantizar que se conserve mejor el calor sino que también las mediciones censadas serán más confiables, puesto que la eficiencia del colector solar va a ser producto total de la transferencia que el sistema gana en el intercambio de calor en la caja.

- En las pruebas previas a la final se tenía una válvula cheque en el tubo externo por donde sube el agua hasta el tanque gracias al efecto de termosifón, sin embargo, la válvula cheque en este caso no permitía el flujo más allá de donde ella estaba ubicada; esto producía un bloqueo al flujo de agua caliente y por supuesto, haciendo disfuncional al colector solar. Se recomienda usar una válvula de globo en lugar de una válvula cheque, la cual deberá estar totalmente abierta en las pruebas.
- Las condiciones climatológicas no fueron favorables para lograr la mayor eficiencia posible el día de las pruebas, fue un día poco despejado y las nubes constantemente bloqueaban la radiación directa, la cual es la más significativa para producir agua caliente con del colector. Es importante mencionar que aunque el día hubiese estado con condiciones favorables, es decir, que la radiación directa sea continua a lo largo de las horas de prueba, las fugas hubiesen tendido a incrementarse porque el agua hubiese bajado su densidad, y dichas fugas involucrarían una compensación volumétrica con agua fría con mayor frecuencia. Por lo anterior se concluye que el mayor inconveniente en este colector solar son las fugas, siendo las fugas internas las más significativas que las externas en la medida en que son las más complejas de reparar.
- El tanque no tiene aislante, por lo que los rayos directos del sol pueden calentar el agua acumulada en este, afectando así que todo incremento de temperatura no sólo viene del intercambio de energía en la caja, cuestión que hace la eficiencia del colector no sea precisa.
- El haber agregado agua durante las pruebas sin tomar nota de la hora en que se la hizo, hace que la lectura de la gráfica Temperatura del Tanque vs Temperatura Ambiente (T_4 vs T_3) parezca errática en varios puntos pero especialmente en la

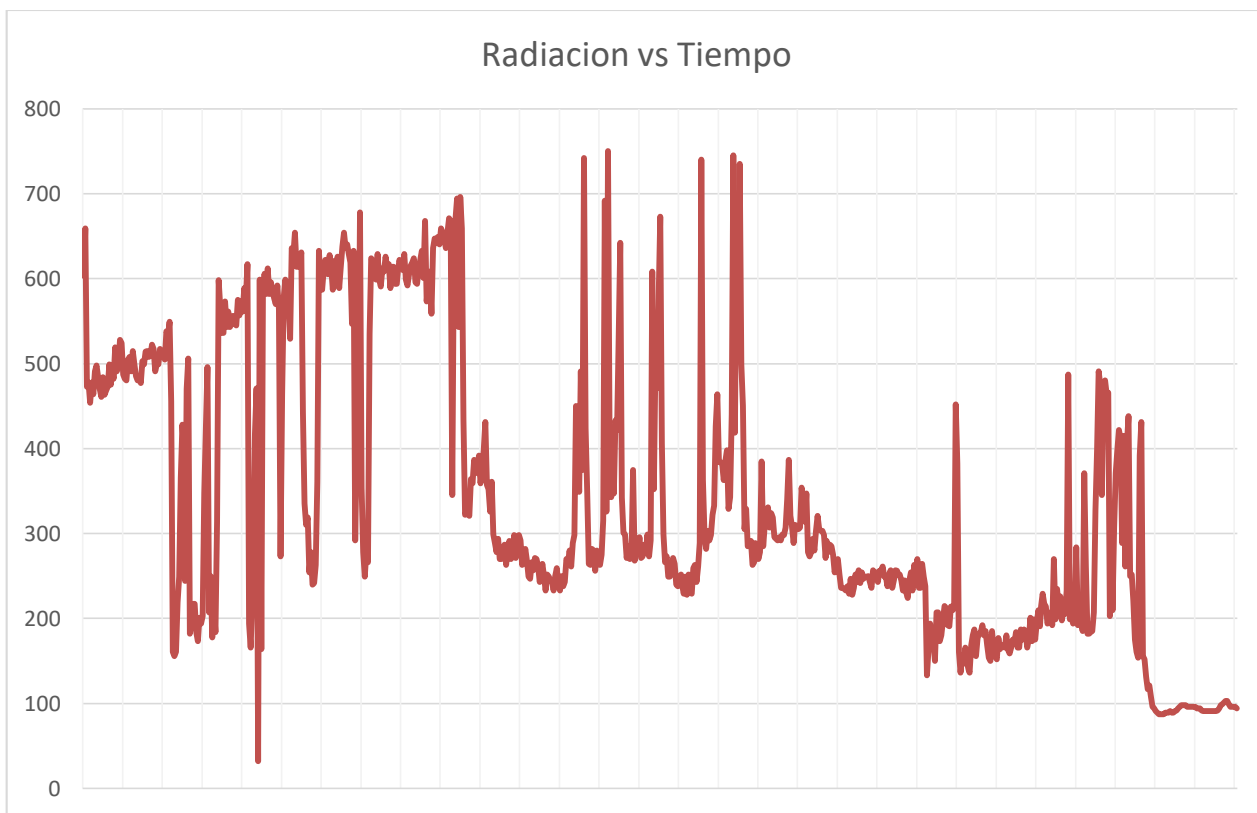
temperatura máxima del tanque que es 49°C y la temperatura ambiente en ese punto es 32°C.

- Las temperaturas censadas y tabuladas de tienen apariencia errática ya que al agregar agua al sistema para compensar pérdidas volumétricas, se nota una reducción de éstas de forma brusca, mostrando y marcando la principal falla en la construcción.
- Otra dificultad fue la poca cantidad de área de contacto entre el serpentín y las placas, esto a causa de la dificultad propone el soldar aluminio y con mayor dificultad al ser los espesores de pared del serpentín y las placas. Esto trae como consecuencia que el sistema de aletas sea poco efectivo a la hora de transferir el calor hacia el agua que fluye a través del serpentín, por lo tanto, esto repercute en la eficiencia del colector.

Gráfica 6.2.1. Radiación vs Temperatura



Gráfica 6.2.2 Radiación vs Tiempo



ANEXOS.

ALGORITMO DE DISEÑO DEL COLECTOR EN SOFTWARE EN EES

"Cálculo colector solar"

$m_{\dot{}}=V_{\dot{}}*0,001*\rho$ "Flujo másico en kg/dia"

$V_{\dot{}}=40$ [L/dia] "Caudal"

$\rho=1000$ [kg/m³] "Densidad del agua"

"siguiente"

$Q_{\dot{}}_u=V_{\dot{}}*\rho*C_p*(T_{sal}-T_{ent})$ "Calor útil"

$C_p=4,180$ [kJ/kg-K] "Calor específico"

$T_{sal}=45$ [°C] "Temperatura de salida del colector"

$T_{ent}=19$ [°C] "Temperatura de entrada del colector"

"siguiente"

$A=V_{\dot{}}*\rho*C_p*(T_{sal}-T_{ent})/(\eta*H)$

$\eta=0,5$ "Eficiencia del colector, inicialmente
asumida por recomendaciones teóricas"

$H=18400000$ [kJ/m²-dia] "Este valor es tan alto porque se expresa
en Mega"

"Volumen del tanque"

$V_t= 80*A$ "Según el libro de ingeniería solar de Orozco, la capacidad en
general de los colectores de placa plana es de 80 L/m²"

"Cálculo del diámetro del tanque"

$$D_t = \sqrt{4 \cdot V_t \cdot 0,001 / (0,5 \cdot \pi)}$$

"sqrt es la raíz cuadrada"

"Recalculando el volumen del tanque"

$$V_{t_recal} = \pi \cdot (4 \cdot V_t \cdot 0,001 / (0,5 \cdot \pi)) \cdot 0,5 / 4$$

"Cálculo del área exterior del tanque"

$$A_t = ((\pi \cdot D_t^2) / (2)) + (\pi \cdot D_t \cdot 0,5)$$

"Las siguientes líneas son el recálculo del área del colector solar"

"Para recalcular el área del colector solar de placa plana se necesita determinar el coeficiente de pérdidas del tanque"

$$T_{prom} = (T_{sal} + T_{min}) / 2$$

$T_{min} = 35 \text{ } ^\circ\text{C}$ "Se dice que $T_{min} = 35 \text{ } ^\circ\text{C}$ porque es la temperatura mínima que se espera que alcance el colector"

$$U_T1 = (Q_{UA} \cdot 0,1) / (24 \cdot A_t \cdot 3600 \cdot (T_{prom} - T_a))$$

"0,1 y 24 es del criterio ASHRAE"
"3600 es el factor de conversión para que U_T quede en $\text{W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$ "

$$Q_{UA} = 1787530 \text{ [J]}$$

$T_a = 22 \text{ [}^\circ\text{C]}$ "Temperatura del ambiente en Pereira"

"Ahora se calcula el calor perdido $Q_{\dot{T}}$ en el tanque"

$Q_{\dot{T}} = U_T \cdot A_t \cdot (T_{\text{sal}} - T_a)$ "Calor perdido en Watts"

"Ahora se calculan las pérdidas de calor anuales con el anterior cálculo"

$Q_{\dot{T}\text{anual}} = Q_{\dot{T}} \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 365$ "Los escalares son 3600s/h y 24h/día y 365día/año con lo que se obtiene las pérdidas anuales"

"Calor útil del colector solar"

$Q_{\dot{U}A} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{\text{sal}} - T_{\text{amb}}) \cdot 365 \cdot 1000$ "365días/año * 40kg/día"

$T_{\text{amb}} = 19 \text{ [}^\circ\text{C]}$

"Con los valores determinados anteriormente de $Q_{\dot{U}A}$ y $Q_{\dot{T}}$ se recalcula el área"

$A_{\text{recalculada}} = (Q_{\dot{U}A} + Q_{\dot{T}\text{anual}}) / (\eta \cdot H \cdot 365)$ "Se multiplica por 365días para que el área sea en m^2 "

"El área recalculada sigue dando muy cercano a $0,5 \text{ m}^2$ por lo que se concluye que definitivamente el área quedó bien determinada"

"Cálculo coeficiente de pérdidas lado inferior U_i "

$$U_i = K_{ais} / X_{ais}$$

aislante inferior"

" K_{ais} :conductividad del aislante X_{ais} :Espesor del

$$K_{ais} = 0,026 \text{ [W/m-k]}$$

$$X_{ais} = 0,1 \text{ [m]}$$

"Cálculo coeficiente de pérdidas hacia los lados U_b "

$$U_b = (K_{ais} / X_b) * (A_b / A_c)$$

$$A_b = 0,129 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A_c = 0,5 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$X_b = 0,02 \text{ [m]}$$

"Coeficiente de convección placa-cubierta $h_{c.pc}$ "

$$T_{prom2} = (T_p + T_c) / 2$$

$$T_p = 328,65 \text{ [K]}$$

aplicando el método de Orozco"

"55,5°C es la temperatura de la placa que asumida

$$T_c = 305,15 \text{ [K]}$$

lo que recomienda Orozco"

"32 °C es la temperatura de la cubierta asumida aplicando

{Las propiedades del aire a T_{prom} son $K=0,027883$ $\rho=1,11685$ $C_p=1005,69$
 $\beta=17,161$ $\beta=3,156e-3$ }

"Las propiedades son sacadas del libro de incropera, en sus anexos"

"En el cálculo del número de Nusselt para convección libre entre placas paralelas ($0 \leq T \leq 75^\circ C$) siempre y cuando el número de Rayleigh sea menor a 10^5 "

$$a_2 = K_{aire} / (\rho_{aire} \cdot C_{paire})$$

$$K_{aire} = 0,027883 \text{ [W/m-K]}$$

$$\rho_{aire} = 1,11685 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$C_{paire} = 1005,69 \text{ [J/kg-K]}$$

"Ecuación de Rayleigh"

$$R_a = (g \cdot B \cdot (T_p - T_c) \cdot L^3) / (\nu \cdot a)$$

$$g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

"Gravedad en SI"

$$B = 0,003156 \text{ [1/K]}$$

"Coeficiente de expansión"

$$L = 0,025 \text{ [m]}$$

"Distancia placa-cubierta"

$$\nu = 0,000017161 \text{ [m}^2\text{/s]}$$

"Viscosidad cinemática"

" $R_a = 26685$ y $26685 \leq 10^5$ entonces se prosigue a calcular el número de Nusselt"

$$N_u = 1 + 1,44 \cdot (1 - (1708)/(R_a \cdot \cos(0)))$$

"Diseño del tanque de almacenamiento y su tubería"

$t = (P \cdot D) / (2 \cdot \sigma_c)$ "t es el espesor de la placa del tanque, la cual se fundamenta en tubos de pared delgada. La ecuación se puede hallar en el Beer de Resistencia de Materiales"

$P = 1378200 \text{ [N/m}^2\text{]}$ "P es la presión máxima que debe soportar el tanque según la guía de especificaciones de calentamiento de agua para uso doméstico con energía solar"

$\sigma_c = 240000000 \text{ [N/m}^2\text{]}$ " σ_c es el esfuerzo circunferencial, ya que es el mayor, por lo que es el que puede causar fallas"

$D = 0,32 \text{ [m]}$ "D es el diámetro del tanque"

"Espesor del aislante"

$X_{\text{aislante}} = K_{\text{ais}} / U_T$ "Espesor del aislante térmico del tanque interior"

$K_{\text{aistanque}} = 0,026 \text{ [W/m-K]}$ " K_{ais} es la conductividad térmica del poliuretano"

$U_T = 0,18 \text{ [W/m}^2\text{-K]}$ " U_T fue determinado en la primera parte de los cálculos"

ALGORITO EN ARDUINO

```
#include <OneWire.h>

#include <DallasTemperature.h>

#include "DHT.h"

int rad=0;

OneWire ourWire1(2);

OneWire ourWire2(3);

OneWire ourWire3(4);

#define DHTPIN 7

#define DHTTYPE DHT11

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

DallasTemperature sensors(&ourWire1);

DallasTemperature sensors2(&ourWire2);

DallasTemperature sensors3(&ourWire3);

void setup() {

  Serial.begin(115200);

  sensors.begin();

  sensors2.begin();

  sensors3.begin();

  dht.begin();
```

TABLA DE PRUEBAS RADIACIÓN Y TEMPERARTURAS

Donde:

Iteración: Cada unidad de que avanza la iteración equivale a 30 segundos, siendo el tiempo desde el inicio de las pruebas del colector solar.

T1: Temperatura de entrada del agua al sistema.

T2: Temperatura de salida del sistema.

T3: Temperatura en el tanque.

T4: Temperatura ambiente.

Íteración	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	Radiación(W/m ²)
1	25	25	27	31	603
2	25	25	30	31	659
3	25	26	31	31	473
4	25	26	31	31	478
5	25	26	31	30	454
6	25	26	31	31	478
7	25	26	32	30	464
8	25	26	32	30	491
9	25	27	33	31	498
10	25	27	33	31	484
11	25	27	33	31	470
12	25	27	33	31	461
13	25	27	32	32	484
14	25	27	33	32	463
15	25	28	33	32	468
16	25	28	33	32	473
17	25	28	32	32	499
18	25	32	34	32	475
19	25	33	35	32	498
20	25	34	36	32	482
21	25	34	36	32	519
22	25	34	37	32	491
23	25	34	37	32	499
24	25	34	36	32	528

26	26	34	29	32	524
26	26	34	28	32	487
27	26	34	28	32	482
28	26	34	29	32	480
29	26	34	29	33	505
30	26	34	27	33	508
31	26	33	25	33	491
32	26	33	25	33	515
33	26	33	25	33	499
34	25	33	25	33	485
35	27	33	25	33	480
36	27	33	26	33	484
37	27	33	27	33	477
38	27	33	27	33	503
39	27	33	27	33	499
40	27	33	28	33	514
41	27	33	28	33	515
42	27	33	28	33	508
43	27	33	29	33	510
44	27	32	29	33	522
45	27	32	29	33	517
46	27	32	30	32	491
47	27	32	30	32	499
48	27	32	30	32	499
49	27	32	30	32	517
50	27	32	30	32	510
51	27	32	31	32	514
52	27	32	31	33	505
53	27	32	31	32	538
54	27	32	31	32	533
55	27	32	31	32	549
56	27	32	32	33	456
57	27	32	32	33	161
58	27	31	32	33	156
59	27	31	32	33	161
60	27	31	32	33	219
61	26	31	32	32	249
62	26	31	32	32	366

63	26	31	32	32	428
64	26	31	32	32	408
65	26	31	32	32	244
66	26	30	32	32	470
67	26	30	33	32	506
68	26	30	33	32	182
69	26	30	33	32	196
70	26	30	33	31	217
71	26	30	32	31	217
72	26	30	32	31	184
73	26	30	32	31	173
74	25	29	32	31	201
75	25	29	32	31	194
76	25	29	32	30	203
77	25	29	32	30	347
78	25	29	33	31	424
79	25	29	33	31	496
80	25	29	33	30	207
81	25	29	33	30	250
82	25	29	33	30	178
83	25	29	33	30	214
84	25	29	33	30	184
85	25	29	32	30	314
86	25	28	33	30	598
87	25	29	33	30	566
88	25	29	33	30	536
89	26	29	33	31	536
90	26	29	33	31	573
91	26	29	33	31	543
92	26	29	33	31	561
93	26	30	33	31	543
94	26	30	33	32	547
95	27	30	33	32	556
96	27	31	34	32	547
97	27	31	34	31	545
98	27	31	34	32	575
99	27	31	34	31	557
100	27	31	34	31	573

101	27	32	34	31	561
102	27	32	34	31	589
103	27	32	35	31	577
104	28	32	35	31	617
105	28	32	35	32	194
106	28	32	35	32	166
107	28	32	35	32	224
108	27	32	35	32	329
109	27	32	35	32	417
110	27	32	35	31	471
111	27	32	35	35	32
112	27	32	35	32	599
113	28	32	35	35	164
114	28	32	35	32	584
115	28	33	35	33	606
116	28	33	36	33	582
117	28	33	36	34	612
118	28	33	36	34	582
119	28	33	36	34	596
120	28	33	36	35	585
121	28	33	36	34	577
122	28	34	36	34	570
123	28	34	36	34	592
124	28	34	37	34	564
125	28	34	37	34	273
126	28	34	37	34	464
127	28	34	37	34	578
128	28	34	37	35	599
129	29	34	37	35	568
130	29	34	37	35	573
131	29	34	37	35	529
132	29	34	37	35	636
133	29	34	37	35	628
134	29	34	38	35	654
135	29	34	38	35	614
136	29	34	38	35	614
137	29	34	38	35	615
138	29	34	38	35	631

139	29	35	38	36	442
140	29	35	38	36	335
141	29	35	38	36	310
142	29	35	38	36	319
143	29	35	38	35	254
144	29	35	39	36	278
145	29	35	39	35	240
146	29	34	39	35	242
147	29	34	39	35	263
148	29	34	38	35	361
149	29	34	38	35	633
150	29	34	39	35	591
151	29	33	39	35	587
152	29	33	39	35	610
153	29	33	39	36	622
154	29	33	39	36	622
155	29	34	39	35	605
156	29	34	39	35	628
157	29	34	39	35	614
158	29	34	39	35	587
159	29	34	39	36	621
160	29	35	39	36	592
161	29	35	40	36	626
162	29	35	48	36	589
163	30	35	40	37	614
164	30	35	40	37	638
165	30	35	40	37	654
166	30	35	40	37	636
167	29	36	40	37	640
168	30	36	40	37	629
169	31	36	41	37	619
170	31	36	41	38	547
171	31	37	41	38	633
172	31	37	41	38	292
173	31	37	41	37	406
174	31	37	41	37	442
175	31	37	41	37	678
176	31	37	41	37	354

177	31	37	41	37	278
178	31	36	41	38	249
179	31	36	41	37	280
180	31	36	41	37	266
181	31	36	41	37	535
182	31	26	41	36	624
183	31	36	42	36	621
184	30	36	42	35	617
185	30	36	42	35	599
186	30	36	42	36	629
187	30	36	42	36	599
188	30	36	42	36	591
189	30	36	42	35	612
190	30	36	42	35	608
191	30	37	42	35	626
192	31	37	42	36	612
193	31	37	42	36	617
194	31	37	43	36	589
195	31	37	43	36	614
196	31	37	43	36	614
197	31	38	43	36	594
198	31	38	43	36	594
199	31	38	43	37	608
200	31	38	43	37	622
201	31	38	43	37	614
202	31	38	44	37	610
203	31	38	44	36	629
204	31	38	44	37	599
205	32	38	44	37	592
206	32	39	44	37	605
207	32	39	44	36	615
208	32	39	45	36	619
209	32	39	45	37	624
210	32	39	45	37	596
211	32	39	45	37	594
212	32	39	45	37	612
213	32	39	45	37	622
214	32	39	45	37	633

215	32	39	45	37	601
216	32	39	45	38	1019
217	32	39	45	38	668
218	32	39	46	38	573
219	32	38	46	38	599
220	32	38	46	38	608
221	32	38	46	38	559
222	33	38	46	38	636
223	33	38	46	38	647
224	33	38	46	38	642
225	33	39	46	38	649
226	33	39	46	38	640
227	33	39	46	37	659
228	33	39	47	37	654
229	34	39	47	37	647
230	34	40	47	37	636
231	34	40	47	37	654
232	34	40	47	37	671
233	34	40	47	38	668
234	34	40	47	38	345
235	34	40	47	38	636
236	34	40	47	37	670
237	34	40	47	37	694
238	34	40	47	37	543
239	34	40	47	37	696
240	34	40	47	37	659
241	34	40	47	37	433
242	34	40	47	37	322
243	34	40	47	37	328
244	34	40	47	37	322
245	34	40	47	36	321
246	34	40	46	36	364
247	34	40	46	36	359
248	34	40	46	36	387
249	34	40	46	35	375
250	33	39	45	35	371
251	33	39	45	35	392
252	33	39	45	34	359

253	33	39	45	34	377
254	33	39	45	34	398
255	33	39	45	34	431
256	33	39	45	35	357
257	33	39	45	35	352
258	33	39	45	34	326
259	33	39	45	34	361
260	33	39	45	34	299
261	33	39	45	34	289
262	33	38	44	34	278
263	33	38	44	34	294
264	33	38	44	33	270
265	33	38	43	33	270
266	33	37	43	33	280
267	32	37	42	33	287
268	32	37	42	33	263
269	32	37	42	33	282
270	32	36	42	33	291
271	32	36	42	32	270
272	32	36	42	32	273
273	32	36	42	32	298
274	31	36	42	31	271
275	31	36	42	31	291
276	31	36	42	31	298
277	31	36	42	31	292
278	31	36	42	31	263
279	31	35	42	31	270
280	31	35	42	31	282
281	31	35	42	31	268
282	31	35	42	31	249
283	31	35	42	31	247
284	31	35	42	30	266
285	31	35	42	30	257
286	31	35	42	30	271
287	30	35	42	30	270
288	30	35	42	30	261
289	30	35	41	30	243
290	30	34	41	30	254

291	30	34	41	30	264
292	30	34	41	30	250
293	30	34	41	30	233
294	30	34	41	30	252
295	30	34	41	30	249
296	30	33	41	30	245
297	30	33	41	30	243
298	30	33	42	30	233
299	30	33	42	30	250
300	30	33	42	30	259
301	30	33	42	30	238
302	30	33	42	30	233
303	30	33	42	30	250
304	30	32	41	29	238
305	29	32	41	29	243
306	29	32	41	29	270
307	29	32	41	29	266
308	29	32	41	29	280
309	29	31	41	29	261
310	29	31	41	29	289
311	29	31	41	30	298
312	29	31	41	30	450
313	29	31	41	30	422
314	29	31	42	30	349
315	29	31	42	30	491
316	29	31	42	30	375
317	29	31	43	30	742
318	29	31	43	31	424
319	29	31	44	31	349
320	29	31	44	31	264
321	29	31	44	31	263
322	29	31	44	30	282
323	29	31	43	30	280
324	29	31	43	30	256
325	29	30	43	30	280
326	29	30	42	30	270
327	29	30	42	30	263
328	29	30	42	30	275

329	29	30	42	30	315
330	29	30	42	30	692
331	29	30	42	30	326
332	29	30	43	31	750
333	29	30	44	31	406
334	29	30	44	31	343
335	30	30	44	32	389
336	30	30	44	32	347
337	30	30	44	32	433
338	30	31	44	32	422
339	30	31	44	32	529
340	30	31	44	32	642
341	30	31	44	32	342
342	30	31	44	33	301
343	30	31	44	32	299
344	30	30	44	32	271
345	30	30	43	32	285
346	30	30	43	32	270
347	30	30	42	32	271
348	30	30	42	32	375
349	30	30	42	32	268
350	30	30	42	32	287
351	30	30	41	32	277
352	30	30	41	32	296
353	30	30	41	32	271
354	30	29	41	32	273
355	30	29	41	32	287
356	30	29	41	32	277
357	30	29	41	32	299
358	30	29	41	32	273
359	29	29	41	32	292
360	29	29	41	32	608
361	29	29	41	32	352
362	29	29	41	32	503
363	29	29	41	32	471
364	29	29	42	32	578
365	29	29	42	32	673
366	29	29	43	32	406

367	29	29	43	33	299
368	29	29	43	33	266
369	30	29	43	33	273
370	30	29	42	33	249
371	30	29	42	32	249
372	30	29	42	32	256
373	30	29	41	32	271
374	30	29	41	32	264
375	30	29	41	32	240
376	29	29	41	32	238
377	29	29	40	32	245
378	29	29	40	32	252
379	29	29	40	32	236
380	29	29	40	32	229
381	29	29	40	32	249
382	29	28	40	32	228
383	29	28	40	32	252
384	29	28	40	32	231
385	29	28	40	32	229
386	29	28	40	31	259
387	29	28	39	31	263
388	29	28	39	31	243
389	28	28	39	31	261
390	28	28	39	31	289
391	28	28	39	31	740
392	28	28	40	32	363
393	28	28	41	32	298
394	29	28	41	32	282
395	29	28	41	31	303
396	29	29	41	31	292
397	29	29	41	31	298
398	29	29	41	31	322
399	29	29	41	31	333
400	29	29	41	31	426
401	29	29	41	30	464
402	29	29	41	30	384
403	29	29	41	31	384
404	29	29	41	31	382

405	29	29	41	31	363
406	29	29	49	32	385
407	29	29	40	31	398
408	29	29	38	32	329
409	30	29	37	32	343
410	30	29	37	32	440
411	30	29	37	32	745
412	30	30	37	32	419
413	30	30	37	33	673
414	30	31	38	33	543
415	30	34	41	33	735
416	31	36	42	33	499
417	31	37	43	33	450
418	31	38	43	33	305
419	31	38	44	33	329
420	31	38	44	33	285
421	31	38	44	33	291
422	31	39	44	33	291
423	31	38	44	33	263
424	31	38	44	33	266
425	31	38	44	33	289
426	31	38	44	32	285
427	31	38	44	32	270
428	31	38	44	32	278
429	31	37	44	32	385
430	31	37	44	33	285
431	31	37	44	44	310
432	31	37	44	32	317
433	31	36	44	32	331
434	31	36	44	32	307
435	31	36	43	32	324
436	31	36	43	32	319
437	31	36	43	32	296
438	31	36	43	32	294
439	31	36	43	32	292
440	31	36	43	32	296
441	31	36	43	32	292
442	31	36	43	32	299

443	31	36	43	31	298
444	31	35	43	32	307
445	31	35	35	31	340
446	31	35	43	31	387
447	31	35	43	31	321
448	31	35	43	31	308
449	31	35	43	31	289
450	31	35	43	31	310
451	31	35	43	31	308
452	31	35	43	31	305
453	31	34	42	31	307
454	31	34	42	31	354
455	31	34	42	31	335
456	31	34	42	32	314
457	31	34	42	32	347
458	31	34	42	32	278
459	31	34	42	32	273
460	31	35	42	32	278
461	31	35	42	32	294
462	31	35	42	32	280
463	31	35	42	32	303
464	31	34	42	31	321
465	31	34	42	32	305
466	30	34	42	31	303
467	30	34	42	31	303
468	30	34	42	31	298
469	30	34	41	31	271
470	30	34	41	31	291
471	30	34	41	31	278
472	30	34	41	30	287
473	30	34	41	30	285
474	30	34	41	30	275
475	30	34	41	30	254
476	30	34	41	30	266
477	30	34	41	30	270
478	20	34	40	30	252
479	30	34	40	30	236
480	30	34	40	30	236

481	30	34	40	30	235
482	30	34	39	30	233
483	30	34	39	30	238
484	30	34	40	30	229
485	30	34	40	30	247
486	30	34	40	30	228
487	29	34	39	30	236
488	29	33	39	30	252
489	29	33	39	30	243
490	29	33	38	30	257
491	29	33	38	30	242
492	29	33	38	30	254
493	29	33	38	30	247
494	29	33	38	30	249
495	29	33	38	30	249
496	29	33	38	30	250
497	29	32	38	30	243
498	29	32	38	30	236
499	29	32	38	30	257
500	29	32	39	30	250
501	29	32	39	30	254
502	29	32	38	30	243
503	29	32	38	30	256
504	29	32	38	30	256
505	29	32	38	30	261
506	29	32	38	30	249
507	29	32	38	30	249
508	29	32	38	30	238
509	29	32	38	30	252
510	29	32	38	30	257
511	29	32	38	29	236
512	29	32	38	29	245
513	29	32	38	30	257
514	29	32	38	30	256
515	29	32	38	30	252
516	29	32	38	30	252
517	29	32	38	30	245
518	29	32	38	30	233

519	29	32	38	30	245
520	29	32	38	30	231
521	29	32	38	30	224
522	29	32	38	30	245
523	29	32	38	30	254
524	29	32	38	30	233
525	29	32	38	30	263
526	29	32	38	30	240
527	29	32	38	30	270
528	29	32	38	30	236
529	29	32	38	30	236
530	29	32	38	30	264
531	29	32	38	30	249
532	29	32	38	30	238
533	29	32	38	30	133
534	29	32	38	30	164
535	29	32	38	30	194
536	29	32	38	30	170
537	29	32	38	30	175
538	29	32	38	30	150
539	29	32	38	30	207
540	29	32	38	30	207
541	29	32	38	30	173
542	29	32	38	30	180
543	29	32	38	30	198
544	29	32	38	30	215
545	29	32	38	30	212
546	29	32	38	30	192
547	29	32	38	30	191
548	29	32	38	30	214
549	29	32	38	30	210
550	29	32	38	30	212
551	29	32	38	30	452
552	29	32	38	30	382
553	29	32	39	30	161
554	29	32	39	30	136
555	29	32	39	30	156
556	29	33	39	30	147

557	29	33	39	30	166
558	29	33	38	30	149
559	29	33	38	30	140
560	29	33	38	30	136
561	29	33	38	30	168
562	29	33	38	30	180
563	29	33	37	30	187
564	29	32	37	30	156
565	29	32	37	30	177
566	29	32	37	30	182
567	29	32	37	30	184
568	29	32	37	29	192
569	29	32	37	29	180
570	29	32	37	29	185
571	29	32	37	29	168
572	29	32	37	29	154
573	29	32	37	30	150
574	29	32	37	29	185
575	28	32	37	29	166
576	28	32	37	29	156
577	28	31	37	29	152
578	28	31	37	29	177
579	28	31	37	29	164
580	28	31	37	29	168
581	28	31	37	29	168
582	28	31	37	29	166
583	28	31	37	29	180
584	28	30	37	29	163
585	28	30	36	29	159
586	28	30	36	29	166
587	28	30	36	29	175
588	28	30	36	29	171
589	28	30	36	29	184
590	28	30	36	29	166
591	28	29	36	29	166
592	28	29	36	29	187
593	27	29	36	29	175
594	27	29	36	29	187

595	27	29	36	28	185
596	27	29	36	29	166
597	27	29	36	29	175
598	27	29	36	29	201
599	27	28	36	29	173
600	27	28	36	28	199
601	27	28	36	29	175
602	27	28	36	29	196
603	27	28	36	29	210
604	27	28	36	29	191
605	27	28	36	29	214
606	27	28	36	29	229
607	27	28	36	29	217
608	27	28	37	29	214
609	27	28	37	29	194
610	27	28	37	29	199
611	27	28	37	29	207
612	27	28	37	29	192
613	27	28	37	30	270
614	27	28	37	30	199
615	27	28	37	30	235
616	27	28	37	30	214
617	27	28	37	29	226
618	27	28	37	29	198
619	27	28	37	29	214
620	27	28	37	29	205
621	27	28	37	29	233
622	27	28	37	29	487
623	27	28	37	29	199
624	27	28	37	29	203
625	27	28	38	30	194
626	27	28	38	30	198
627	27	28	38	30	284
628	27	28	38	30	192
629	27	28	38	30	207
630	28	28	38	30	196
631	28	28	37	30	185
632	28	28	37	30	371

633	28	28	37	30	261
634	28	28	38	29	182
635	28	28	38	29	182
636	28	28	38	29	184
637	28	29	38	29	185
638	28	29	38	30	207
639	28	29	38	30	328
640	28	29	38	30	398
641	28	29	39	30	491
642	28	29	40	30	475
643	28	29	40	31	345
644	28	29	41	31	461
645	28	30	42	31	480
646	29	30	43	31	464
647	29	30	44	31	466
648	29	30	44	31	203
649	29	31	44	32	333
650	29	31	44	32	210
651	29	31	43	31	307
652	29	31	43	32	371
653	29	31	43	32	398
654	29	31	43	32	422
655	29	31	43	32	412
656	29	31	44	32	289
657	30	31	44	33	415
658	30	31	44	33	261
659	30	31	44	33	406
660	30	31	44	33	438
661	30	31	44	32	250
662	30	31	44	33	252
663	30	31	43	33	221
664	30	31	43	33	175
665	30	30	42	33	161
666	30	30	42	33	154
667	30	30	42	33	392
668	30	30	41	33	431
669	30	30	41	33	156
670	30	30	41	33	152

671	30	30	41	33	131
672	30	30	40	32	117
673	30	31	40	32	121
674	30	31	39	32	108
675	30	31	39	32	96
676	30	31	38	32	94
677	30	30	38	32	91
678	30	30	37	32	89
679	30	30	37	32	87
680	30	30	36	32	87
681	30	30	36	32	87
682	29	30	36	32	87
683	29	30	35	32	89
684	29	29	35	32	89
685	29	29	35	32	89
686	29	29	35	31	91
687	29	29	35	31	89
688	29	29	35	31	89
689	29	29	35	31	91
690	28	29	35	30	92
691	28	29	35	30	94
692	28	28	35	30	96
693	28	28	34	30	98
694	28	28	34	30	98
695	28	28	34	30	98
696	28	28	34	30	98
697	28	28	34	30	96
698	28	28	34	30	96
699	28	28	34	30	96
700	28	28	34	30	96
701	28	28	34	30	96
702	28	28	34	30	96
703	28	28	34	30	94
704	28	28	34	30	94
705	27	27	34	29	94
706	27	27	34	29	92
707	27	27	34	29	91
708	27	27	34	29	91

709	27	27	34	29	91
710	27	27	34	29	91
711	27	27	34	29	91
712	27	27	34	29	91
713	27	27	34	29	91
714	27	27	34	29	91
715	27	27	34	29	91
716	27	27	34	29	92
717	27	27	34	29	94
718	27	27	34	29	98
719	27	26	34	29	99
720	26	27	34	28	101
721	27	26	34	28	103
722	27	26	33	29	103
723	27	26	33	29	99
724	27	26	33	29	96
725	27	26	33	28	96
726	26	26	33	28	96
727	26	26	34	28	96
728	26	26	34	28	94

7. BIBLIOGRAFÍA

1. **Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Ministerio de Minas y Energía y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.** *Atlas de radiación solar de Colombia.* Republica de Colombia, 2005.
2. **Margevicius, José y Schorgmayer, Helmut.** *La energía solar y su aplicación en calentadores solares.* República Dominicana: Universidad Católica Madre y Maestra, 1981.
3. http://www.ecured.cu/index.php/Calentador_de_agua_solar (En línea)
4. **Orozco Hincapié, Carlos Alberto.** *Elementos de Energía Solar.* Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia): Primera Edición, Junio 30 de 1993.
5. **Fernández Salgado, José María.** *Compendio de Energía Solar: Fotovoltaica, Térmica y Termoeléctrica.* Madrid (España): AMV Ediciones y Mundi Prensa, 2008.
6. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMASTÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN.
www.icontec.org.co
7. <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar15/HTML/articulo02.htm> (En línea)